



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**ÚSTAV VODNÍCH STAVEB**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

# **VLIV VRSTVY OBSYPOVÉHO MATERIÁLU SONDY NA CITLIVOST MĚŘENÍ METODOU EIS**

INFLUENCE DIFFERENT MATERIAL LAYER TO THE SENSITIVITY MEASUREMENTS OF THE EIS  
PROBE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

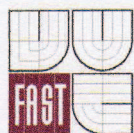
Jakub Slezák

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

doc. Ing. JANA PAŘÍLKOVÁ, CSc.

BRNO 2013





# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

**Studijní program** B3607 Stavební inženýrství  
**Typ studijního programu** Bakalářský studijní program s prezenční formou studia  
**Studijní obor** 3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby  
**Pracoviště** Ústav vodních staveb

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student** Jakub Slezák  
**Název** Vliv vrstvy obsypového materiálu sondy na  
citlivost měření metodou EIS

**Vedoucí bakalářské práce** doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.

**Datum zadání  
bakalářské práce** 30. 11. 2012

**Datum odevzdání  
bakalářské práce** 24. 5. 2013

V Brně dne 30. 11. 2012

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.  
děkan Fakulty stavební VUT



## Podklady a literatura

- ALSTON, C., DANIEL, D. E. AND DEVROY, D. J. (1997). "Design and construction of sand-Bentonite liner for effluent treatment lagoon, Marathon, Ontario", Canadian Geotechnical Journal, No. 34, pp. 841-852.
- BAUMANN, T., WERTH, CH. J. (2004). Visualization and Modeling of Polystyrol Colloid Transport in a Silicon Micromodel. Vadose Zone Journal, 3, 434-443.
- CÍSLEROVÁ, M., VOGEL, T. a kol. (2008). Transportní jevy ve vadózní zóně. Skriptum ČVUT v Praze, Fakulta stavební, KHMKI, KHH. 111s.
- KOLÁŘ, V., PATOČKA, C., BÉM, J. (1983). Hydraulika. SNTL/ALFA, Praha.
- KUTÍLEK, M., KURÁŽ, V., CÍSLEROVÁ, M. (1993). Hydropedologie, skriptum ČVUT, Praha.

## Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Rešerše podkladů k problematice experimentálního stanovení citlivosti senzorů při sledování vybraných procesů v zeminách.

Návrh experimentu pro realizaci měření.

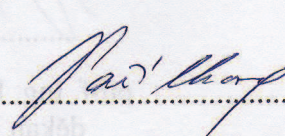
Realizace a zpracování vybraných měření.

Dokumentace a vyhodnocení měření.

## Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

  
doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.  
vedoucí bakalářské práce



## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá otázkou, jaký vliv bude mít vrstva a typ obsypového materiálu sondy na citlivost měření metodou elektrické impedanční spektrometrie. Experiment je realizován v laboratořích ÚVST. Práce navazuje na řešení projektů E!3838, E!4981 a E!7614 v mezinárodním programu EUREKA.

## **Klíčová slova**

Vrstva obsypového materiálu, citlivost, měření, sonda, elektrická impedanční spektrometrie.

## **Abstract**

The bachelor's thesis deals with question, what influence will have different layer and different types of material to sensitivity measurements using the probe of electrical impedance spectrometry. This experiment is realized in laboratories of DWS. The thesis follows the solution of projects E!3838, E!4981 and E!7614 in international EUREKA program.

## **Keywords**

Layer of backfill material, sensitivity, measurements, probe, electrical impedance spectrometry.

## **Bibliografická citace VŠKP**

SLEZÁK, Jakub. *Vliv vrstvy obsypového materiálu sondy na citlivost měření metodou EIS*. Brno, 2013. 78 s., 5 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jana Pařílková, CSc..

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně s využitím rad své vedoucí doc. Ing. Jany Pařílkové, CSc., daných podkladů a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15.5.2013

-----

Jakub Slezák

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji doc. Ing. Janě Pařílkové, CSc., Ing. Marii Fejfarové, panu Luboši Pařílkovi a panu Bořivoji Macíkovi za cenné rady a připomínky, za odbornou, technickou, materiální aj. pomoc při vypracovávání bakalářské práce. Dále chci poděkovat firmě KERAMOST, a.s. za poskytnutí obsypového materiálu pro uskutečnění experimentu, kterým se tato práce zabývá.

V Brně dne 15.5.2013

-----  
Jakub Slezák

# OBSAH

<b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM VELIČIN .....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>2 CÍL PRÁCE .....</b>	<b>14</b>
<b>3 ZEMINA A VODA .....</b>	<b>15</b>
3.1 Zemina .....	16
3.2 Vybrané vlastnosti zemin.....	17
3.2.1 Objemová hmotnost.....	17
3.2.2 Pórovitost.....	17
3.2.3 Kapilarita .....	18
3.2.4 Stejnorodost a izotropie zeminy .....	19
3.3 Druhy vod v zemině.....	19
3.4 Vlhkost.....	20
<b>4 GEOFYZIKÁLNÍ ELEKTRICKÉ METODY .....</b>	<b>22</b>
4.1 Ekvipotenciální metoda .....	22
4.2 Mise-à-la-Masse metoda.....	22
4.3 Indukovaná polarizace .....	23
4.4 Metoda vlastního potenciálu .....	24
4.5 Odporové metody .....	24
<b>5 METODA EIS .....</b>	<b>25</b>
5.1 Princip měření metodou EIS.....	26
<b>6 PŘÍSTROJ Z-METR III .....</b>	<b>27</b>
6.1 Nastavení parametrů měření .....	28
<b>7 EXPERIMENT.....</b>	<b>31</b>
7.1 Příprava experimentu .....	31
7.2 Výchozí materiál pro měření .....	35
7.3 Obsypové materiály .....	37
7.4 Postup při experimentu .....	42
<b>8 KRÁTKODOBÁ MĚŘENÍ.....</b>	<b>45</b>
8.1 Porovnání vzorků v suchém stavu .....	46
8.2 Porovnání vzorků v mokrému stavu .....	52
8.3 Porovnání vrstev obsypu zkoumaných materiálů v mokrému stavu .....	61



<b>9</b>	<b>DLOUHODOBÁ MĚŘENÍ.....</b>	<b>64</b>
9.1	Nasycenost materiálů vodou v čase .....	64
9.2	Porovnání stejnorodosti materiálů .....	69
<b>10</b>	<b>VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>78</b>

## SEZNAM ZKRATEK

<b>zkratka</b>	<b>název</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	oxid hlinitý
EIS .....	elektrická impedanční spektrometrie
IP .....	indukovaná polarizace
LCD .....	displej z tekutých krystalů
LVV .....	Laboratoře vodohospodářského výzkumu
PET .....	polyethylentereftalát
SD .....	paměťová (karta)
SP .....	vlastní potenciál
USB .....	univerzální sériová sběrnice
VES .....	vertikální odporová metoda

## SEZNAM VELIČIN

symbol	jednotka	název
$A$	[m <sup>2</sup> ]	plocha
$d$	[m]	délka elektrod
$d$	[m]	průměr
$d_{ef}$	[m]	efektivní zrno
$d_i$	[m]	velikost zrna
$f$	[Hz]	frekvence
$g$	[m.s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení
$h$	[m]	hloubka
$h_k$	[m]	kapilární výška
$I$	[A]	střídavý elektrický proud
$J$	[A.m <sup>-2</sup> ]	hustota elektrického proudu
$l$	[m]	vzdálenost
$m$	[kg]	hmotnost
$m_d$	[kg]	hmotnost vysušeného vzorku
$m_{PI\%}$	[%]	hmotnostní podíl
$m_W$	[kg]	hmotnost vody
$n$	[%]	pórovitost
$p$	[Pa]	hydrostatický tlak
$p_a$	[Pa]	atmosférický tlak
$R, R_x$	[Ω]	rezistance (reálná část $Z$ )
$S_R$	[%]	stupeň nasycení
$t$	[°C]	teplota
$t$	[s]	čas
$U$	[V]	střídavé napětí
$v$	[m]	výška
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem
$V_P$	[m <sup>3</sup> ]	objem pórů
$V_W$	[m <sup>3</sup> ]	objem vody
$w$	[%]	vlhkost
$X, X_x$	[Ω]	reaktance (imaginární část $Z$ )
$Z$	[Ω]	impedance
$\pi$		Ludolfovo číslo
$\rho$	[kg.m <sup>3</sup> ]	hustota
$\omega$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	kruhová frekvence
$\varphi$	[°]	fázový posun

(Rozměry veličin jsou uvedeny v základních jednotkách SI )



# 1 ÚVOD

Průzkum pomocí elektrických geofyzikálních metod je více než 100 let starý a je jedním z nejčastěji používaných metod pro geofyzikální průzkum. V dnešní době nalézá široké uplatnění v oblasti životního prostředí, zemědělství, vodního hospodářství, geologickém inženýrství, stavebnictví a minerálním průzkumu.

Geofyzikální metody umožňují zpravidla nedestruktivně stanovit fyzikální vlastnosti zkoumaného prostředí. Měření jsou rychlá, ale zároveň dostatečně přesná pro určení požadovaných vlastností materiálů. Měřicí přístroje jsou vhodné pro práci v terénu a s vývojem stále lepších technologií dochází k minimalizaci jejich velikosti, ale zároveň k zvyšování jejich výkonu. Pomocí počítačových programů lze získat velmi kvalitní vyhodnocení.

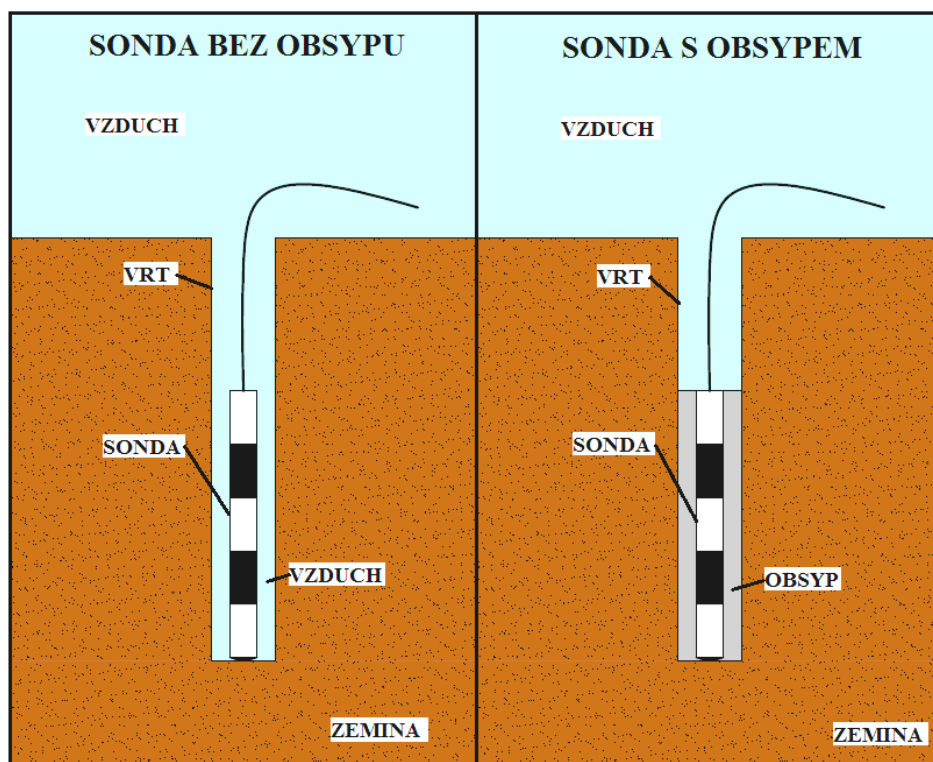
Jako příklady použití těchto metod v praxi lze uvést z oboru vodního hospodářství měření průsaku zemních hrází, detekci hladiny podzemních vod a znečištění podzemních vod. Zejména tato využití jsou s mou prací úzce spjata, protože uvedenými problémy se zabývá Laboratoř vodohospodářského výzkumu (LVV) Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Má práce navazuje na výsledky prací, které byly řešeny především v rámci mezinárodních projektů programu EUREKA (*Pařílková a Pavlík, 2009*), (*Pařílková a Pavlík, 2012*) při měření metodou elektrické impedanční spektrometrie (EIS), která patří mezi elektrické geofyzikální metody.

Další využití mají elektrické geofyzikální metody při zjišťování úrodnosti zemědělské půdy, regulaci závlah s dopadem na hospodaření s vodou, detekci obsahu slané vody v půdě v přímořských oblastech (například delty řek). Velké využití mají v geologii při hledání nalezišť rud a zjišťování jejich velikostí, s úspěchem jsou aplikovány rovněž v archeologii. Jako zajímavost mohu uvést použití jedné z metod pro měření míst s narušením půdy pro vyhledávání hrobů. Ve stavebnictví jsou uplatňovány při zjišťování mechanického porušení nevodivých izolací.

Pro převážnou většinu elektrických metod je při měření velmi důležité, aby byl zachován kontakt elektrických sond s měřeným prostředím. Při neúplném přilnutí materiálu k elektrodám sondy může dojít ke zkreslení naměřených hodnot. Zjištěné výsledky a tím i celá práce tak bude znehodnocena. Mírné netěsnosti je však možno připustit při dlouhodobém monitorování, a to pouze v případech, kdy je opodstatněný předpoklad, že na měřenou elektrickou veličinu nebude působit jiný, než sledovaný jev. V takových případech je možno připustit uvedenou nejistotu měření způsobenou netěsností kontaktu.

Poněvadž je předpoklad poměrně silný, vhodnější je vyhodnocovat měření jako relativní, tedy sledovat změny, které v prostředí probíhají v čase a vyhodnocovat je vůči počátečnímu měření. Další možností je využití různých měřicích metod a aparatur, které však musí pracovat na srovnatelném principu, tzn. budou to metody elektrické.

S problémem zajištění kontaktu mezi sondou a sledovaným prostředím se je možno setkat při aplikování sond hluboko pod povrch. Má-li být vyvrtána díra, musí být použit příslušný vrták s parametry, které odpovídají danému prostředí. Při vrtání do větších hloubek bude potřeba vrták o větším průměru, aby došlo k efektivnímu přenesení točivého momentu a zároveň k nezničení vrtáku. Problém nastává právě ve velikosti průměru vrtu. Sonda, které jsou aplikovány při měření aparaturou pracující na principu metody EIS, která byla realizována řešením uvedených projektů, mají malý průměr. Takže např. při zavedení sondy do průměrově většího vrtu nedochází k úplnému kontaktu povrchu sondy a stěny otvoru. Dále není možné realizovat vrt v písčích bez předpažení, což vyžaduje větší průměry provedeného vrtu. Tato práce se zabývá právě problémem zajištění kontaktu mezi sondou a měřeným prostředím pomocí obsypového materiálu a dopadem vlastností použitého obsypového materiálu na měřenou veličinu – elektrickou impedanci  $Z$ .



Obr. 1.1 Zajištění kontaktu sondy se zemínou

## 2 CÍL PRÁCE

Cílem mé bakalářské práce bylo uskutečnit v laboratorních podmínkách experiment, pomocí kterého by bylo možno posoudit vhodnost měření aparaturou pracující s metodou EIS vzhledem k písčítým materiálům při realizaci obsypu měřicích sond. Práce navazuje na řešení projektů E!3838, E!4981 a E!7614 v mezinárodním programu EUREKA.

Pro měření jsem použil verzi přístroje Z-metr III, který je mobilní a jeho velikost  $0,115\text{ m} \times 0,227\text{ m} \times 0,042\text{ m}$  i váha cca 0,3 kg umožňují snadnou manipulaci i práci v terénu.

Pro experiment jsem navrhl a nechal vyrobít párovou sondu s pěti měřicími elektrodami. Na základě výšky sondy jsem navrhl a zhotovil plastovou válcovou nádobu, do které jsem následně nasypal písek dovezený z lokality Bratčice (v dalším textu je označen jako písek Bratčice). Uvedený písek jsem zvolil za referenční vzorek, tedy výchozí měřené prostředí pro porovnávání jednotlivých měření. Jedná se o modifikovaný písčítý materiál, který byl k dispozici v laboratoři Ústavu vodních staveb a byl upraven pro její potřeby (neobsahuje všechny frakce). Pro obsyp sond jsem použil čtyři vzorky obsypového materiálu, které byly zdarma poskytnuty společností KERAMOST, a.s. Měření jsem provedl pro každý vzorek ve dvou různých tloušťkách obsypu, které jsem volil dle průměru plastových trubek. Při každém měření jsem prostředí shora skrápěl vodou, což simulovalo infiltraci vody do zeminy. Na základě uvedeného experimentu jsem provedl jednotlivá měření jeho různého variantního uspořádání. Porovnání vhodnosti vzorků obsypového materiálu vůči referenčnímu vzorku modifikovaného bratčického písku a dosažené výsledky jsem zhodnotil v závěru práce.



Obr. 2.1 Pracoviště

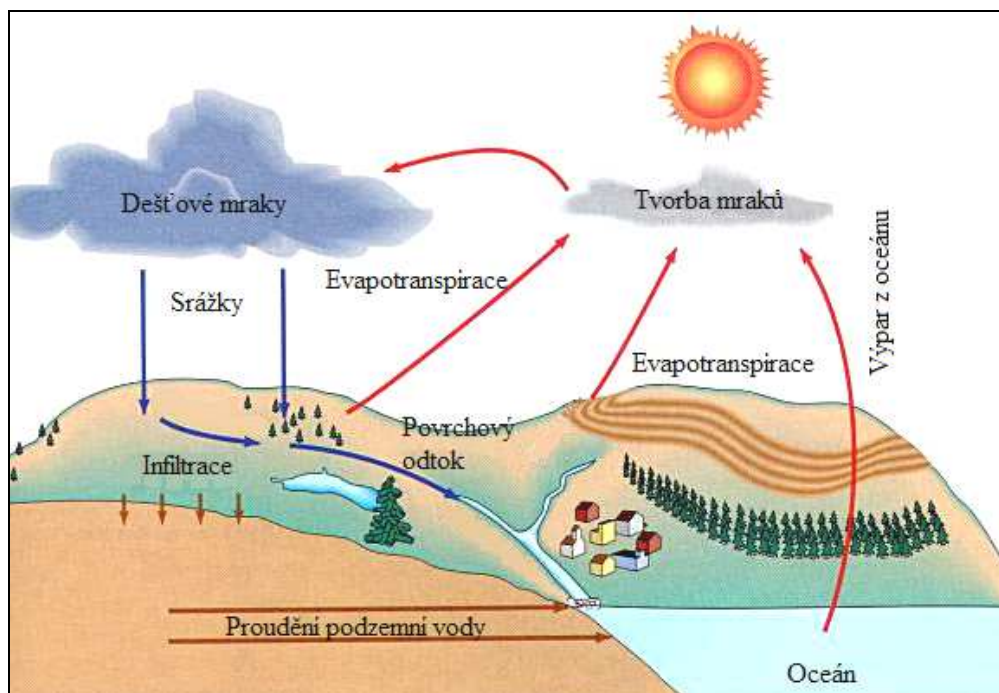


### 3 ZEMINA A VODA

Obečně je možné zeminu [01], [02] definovat jako povrchovou akumulaci zvětralých úlomků hornin a minerálů u povrchu promíchaných s organickými složkami, které na většině míst zemského povrchu pokrývají vrstvy pevného skalního podkladu. Z geologického hlediska je zemina produktem mechanického a chemického zvětrávání hornin ovlivněným procesem akumulace rozpadajících se organismů žijících na Zemi, který se neustále formuje mezi skalním podložím a atmosférou.

Mechanické zvětrávání je fyzikální rozpad a dezintegrace horniny beze změny mineralogického složení. Je způsobeno především účinkem zamrzání vody v puklinách, tlakovým zatížením, tahovým napětím apod. Chemické zvětrávání je způsobeno porušením a rozpadem minerálů v horninách po chemických reakcích s vodou nebo jinými chemickými látkami rozpuštěnými ve vodě, nebo vlivem reakce s plyny rozptýlenými v ovzduší či pod zemským povrchem.

Voda je přirozenou součástí zeminy [01], proto má zemina velmi důležitou funkci v hydrologickém cyklu (Obr. 3.1). Její vlastnosti ovlivňují jaké množství vody ze srážek se vsákne do půdy a jaké množství oteče z povrchu, čímž způsobí například povodně nebo vodní erozi. Výběr vhodné zeminy hraje důležitou roli při výstavbě zemních hrází, kde je důležité omezit průsak akumulované vody tělesem hráze.



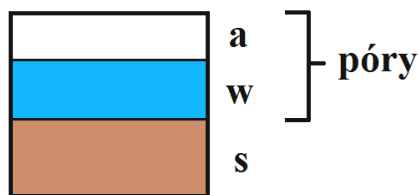
Obr. 3.1 Hydrologický cyklus

Zdroj: [http://kurz.geologie.sci.muni.cz/obrazky\\_ucebnice/obrazek5\\_1.jpg](http://kurz.geologie.sci.muni.cz/obrazky_ucebnice/obrazek5_1.jpg)

### 3.1 Zemina

Ve zjednodušeném pojetí je zemina složená ze 3 následujících fází:

- pevná fáze (s - solid)
- kapalná fáze (w - water)
- plynná fáze (a - air)



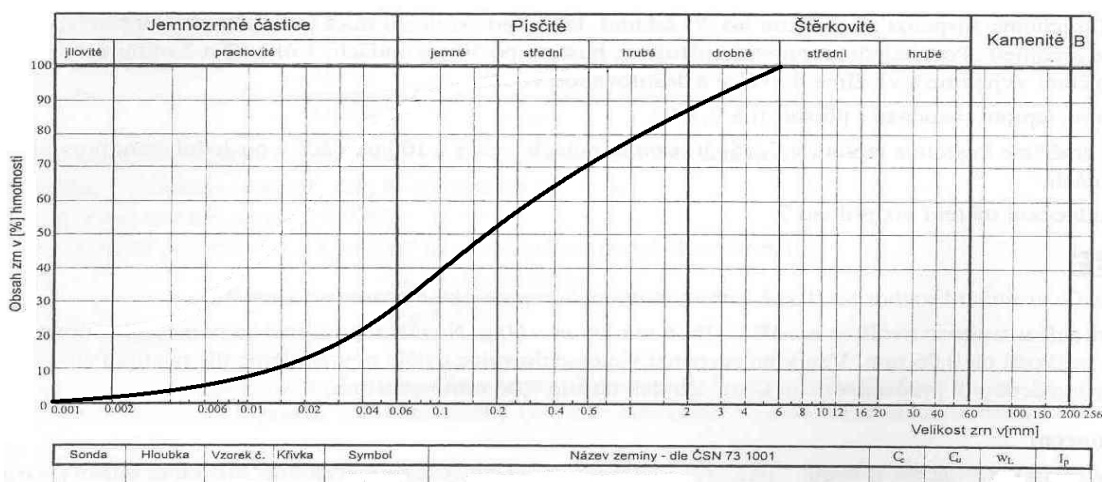
Obr. 3.2 Třífázový systém zeminy

Pevná fáze je tvořena organickými částicemi, půdou, zeminou, zvětralými horninami, skalním podkladem a minerálními zrny. Pevné částice jsou vzájemně propojeny póry. [03] Geometrie a velikost jednotlivých pórů je velmi těžko popsitelná. Podle vzájemného poměru uvedených tří základních fází se mění vlastnosti zemin. Velikost zrn a jejich poměrné zastoupení ve vzorku zeminy zjišťuje zrnitost. Pro její určení používají dva typy zkoušek:

- pro středně- a hrubo-zrnné zeminy - prosévací zkouška,
- jemnozrnné zeminy - pyknometrická zkouška.

Velikost zrn a jejich podíl v zemině se popisuje pomocí křivky zrnitosti. (Obr. 3.3).

Křivka zrnitosti je součtová křivka [04], která vyjadřuje kumulativní relativní četnost jednotlivých zrnitostních frakcí studovaného vzorku zeminy, daných jejich podílem na celkové hmotnosti zeminy. Rozměry zrn zemin se pohybují ve velmi širokém rozpětí, od tisícín až po desítky i stovky milimetrů. Obsah jemných zrn resp. částic přitom ovlivňuje vlastnosti zemin obecně větší měrou než hrubší zrna. Křivky zrnitosti se znázorňují zásadně v semilogaritmických souřadnicích. Logaritmické vyjádření průměrů zrn umožňuje dostatečně přesné znázornění podílu všech průměrů až do nejmenších. Pomocí křivky zrnitosti lze například zeminu klasifikovat, určit propustnost, či její vhodnost do filtračních vrstev.



Obr. 3.3 Křivka zrnitosti zemin

Zdroj: <http://files.lunac.webnode.cz/200000033-a3b2da4ad5/k%C5%99ivka%20zrnitosti.jpg>

Ve stavebnictví lze zeminy rozdělit např. podle velikosti pevných částic (Tab. 3.1).

**Tab. 3.1 Klasifikace zemin - orientační hodnoty [02]**

Druh zeminy	Velikost částic [mm]
Jíly	< 0,002
Prach	0,002 až 0,06
Písek	0,06 až 2
Štěrk	2 až 100
Kameny	100 až 200
Balvany	> 200

Zrnitostní složení patří mezi jeden z nejdůležitějších faktorů popisujících tvar a velikost pórů. Každý pór představuje dutinu (mezeru) mezi pevnými částicemi. [03] Tyto dutiny jsou vyplněny kapalnou nebo plynnou složkou. Kapalnou fází představuje voda, vodní roztoky a jiné vodou nemísitelné kapaliny. Plynná fáze obsahuje vzduch, aerosoly a ostatní plyny.

## 3.2 Vybrané vlastnosti zemin

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, pórovitý materiál je tvořen zeminou a póry vyplněnými vodou a vzduchem. Na základě tohoto poznatku je možno specifikovat vlastnosti porézního prostředí. Nebudu se zde zabývat všemi vlastnostmi, ale jen těmi, které nejvíce souvisejí s mým experimentem.

### 3.2.1 Objemová hmotnost

Objemovou hmotnost zeminy lze charakterizovat jako hmotnost jednotkového objemu zeminy i s póry. [05] Póry mohou být vyplněny vodou nebo vzduchem. Objemová hmotnost  $\rho$  je dána vztahem:

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{]}, \quad (3.1)$$

kde  $m$  je hmotnost zeminy ve vlhkém stavu a  $V$  je objem zeminy.

### 3.2.2 Pórovitost

Zeminy jsou soustavou pevných částic o různém tvaru (např. kulovitý, jehlicový, oválný, šupinový, atd.) a velikosti (určuje zrnitostní zkouška), mezi nimiž vznikají dutiny neboli póry. Pórovitost je důležitou vlastností pro ocenění ulehlosti a nakypřenosti zeminy [06], které mají vliv na její pevnost a stlačitelnost. Zeminy s malou pórovitostí vykazují menší



deformaci a větší pevnost ve smyku. Takže mohou být využity jako základové půdy nebo jako těsnící část zemních hrází. Pórovitost  $n$  lze vyjádřit jako podíl pórů  $V_p$  v celkovém objemu zeminy  $V$  dle základního vztahu:

$$n = \frac{V_p}{V} \cdot 100 [\%]. \quad (3.4)$$

V závislosti na velikosti zrn pevných částic se mění pórovitost. Příklady jsou uvedeny v tabulce (Tab. 3.2). Jedná se jen o orientační hodnoty mezí, ve kterých se obvykle zeminy vyskytují.

**Tab. 3.2 Orientační hodnoty pórovitosti [03]**

<b>Zemina</b>	<b>Pórovitost [%]</b>
Štěrk hrubý	24 - 36
Štěrk jemný	25 - 38
Písek hrubý	31 - 46
Písek jemný	26 - 53
Prach	34 - 61
Jíl	34 - 60

### 3.2.3 Kapilarita

Kapilarita je schopnost zemin vést vodu proti směru gravitační síly působením kapilárních sil. [07] Tato schopnost je úzce spjata s povrchovým napětím vody. Kapilární pásmo se nachází nad volnou hladinou gravitační vody a zasahuje až do výšky  $h_k$ , která je pro každou zeminu různá (Tab. 3.3). V kapilárním pásmu je hydrostatický tlak  $p$  menší než atmosférický  $p_a$ , a proto dochází ke vztlínání vody. Tlak v kapilárním pásmu lze vypočítat dle vzorce:

$$p = p_a - \rho \cdot g \cdot h_k \text{ [Pa]}, \quad (3.5)$$

kde  $\rho$  je hustota vody [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] a  $g$  je tíhové zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ].

**Tab. 3.3 Kapilární výšky různých zemin [06]**

<b>Zemina</b>	<b>Kapilární výška <math>h_k</math> [m]</b>
Písek	0,03 – 0,1
Jemný písek	0,1 – 0,5
Hlinitý písek	0,5 – 2,0
Sprašová hlína	2,0 – 5,0
Jílovohlinitá zemina	5 – 10

### 3.2.4 Stejnorodost a izotropie zeminy

Zemina je stejnorodá, neboli homogenní, pokud jsou její filtrační vlastnosti ve všech bodech shodné, jinak se jedná o prostředí heterogenní. Zemina je izotropní, pokud jsou její filtrační vlastnosti v daném bodě nezávislé na směru proudění podzemní vody, jinak se jedná o anizotropní prostředí. Zemina se jeví jako heterogenní anizotropní prostředí, protože každá částice nemá stejný tvar a vznikají tím různé velikosti a tvary pórů. Pro popis jevů v zemině se často používá zjednodušení [06] a zemina se bere jako homogenní izotropní prostředí. Využívají se tedy průměrné hodnoty velikosti zrn a pórů.

### 3.3 Druhy vod v zemině

Voda se v zeminách a horninách [07] vyskytuje v různých formách:

- **Volná voda**, neboli gravitační voda, se pohybuje zeminou vlivem převážně gravitační síly.
- **Kapilární voda** – voda vztlínající důsledkem povrchového napětí vody nad hladinu gravitační vody. Výška je nepřímo úměrná velikosti pórů (písky – cm, jíly – m).
- **Voda vázaná** – okolo pevných částí je vytvořen vodní obal, který je k povrchu zrn zeminy vázán elektrochemickými a elektromolekulárními silami. Tato voda ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti zeminy, především má vliv na soudržnost zeminy. Voda může být pevně nebo slabě vázaná. Pevně vázaná voda, neboli hydroskopická voda je ve formě krystalických a strukturálních vod, ty nepodléhají gravitaci a nelze je odstranit při zahřátí zeminy na 105 °C. Naopak slabě vázanou vodu, neboli obalovou, lze ze zeminy odstranit při jejím zahřátí na 105 °C, protože voda je vázaná silovým polem povrchu pevných částic. Vrstva obalové vody [06] má tloušťku asi 0,0005 mm.

Na obrázku (Obr. 3.4) je schematicky znázorněno, jak mohou být v zemině jednotlivé póry vyplněny vodou a vzduchem.



Obr. 3.4 Voda v zemině [06]

### 3.4 Vlhkost

Mechanické vlastnosti zemin závisí kromě mineralogie zejména na velikosti částic a na stavu zeminy. Při zanedbání struktury lze stav hrubozrnné zeminy charakterizovat ulehlostí, u jemnozrnné zeminy vlhkostí. Vlhkost zeminy proto nevyjadřuje její vlastnost, ale stav.

Vlhkost zeminy je dle ČSN CEN ISO/TS 17892-1 Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 1: Stanovení vlhkosti zemin množství vody obsažené v zemině, které lze odstranit vysušením při teplotě 105 °C do stálé hmotnosti. U zemin s krystalicky vázanou vodou (např. s obsahem sádrovce), či u zemin s vyšším obsahem organických látek (> 5%) však dochází vysoušením při uvedené teplotě k chemickým změnám a tuto teplotu (resp. metodu) proto použít nelze. Standardní teplotu 105 °C není vhodné používat ani u vzorků zemin s vyšším podílem organických látek. Pro zeminy se stanovuje váhová a objemová vlhkost.

Váhová vlhkost zeminy  $w$  je definována jako poměr hmotnosti vody v zemině k hmotnosti vysušené zeminy. Vyjádřena je vztahem:

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 [\%], \quad (3.2)$$

kde  $m_w$  je hmotnost vody ve vzorku a  $m_d$  je hmotnost vzorku zeminy po vysušení ( hmotnost vzduchu v pórech je zanedbána).

Vlhkost objemová je definována jako poměr objemu vody v zemině k celkovému objemu zeminy.

$$w_v = \frac{V_w}{V} \cdot 100 [\%], \quad (3.3)$$

kde  $V_w$  je objem vody ve vzorku zeminy a  $V$  je celkový objem vzorku zeminy.

Při stanovování vlhkosti zemin je rovněž třeba dbát na minimální množství vzorku, které např. pro jemnozrnné zeminy činí cca 40 g (jemnozrnné zeminy - jíl, prach), střednězrnné zeminy (zrna 2-10 mm) cca 100 g až 300 g (písek) hrubozrnné zeminy cca 500g až 5 kg (štěrkovité zeminy, štěrkovitopísčité). Dále je potřeba vzít v úvahu, že vlhkost vzorku může výrazným způsobem ovlivnit druh vzorkovací metody, způsob vrtání a odběru vzorku, transport, způsob zabalení vzorku, časový interval od odběru vzorku a dodání do laboratoře (resp.do odběru vzorku v laboratoři) apod. U odebraného vzorku (tzv. rostlá zemina) je nutno zachovat přirozenou vlhkost při odběru (pečlivé zabalení vzorku do neprodyšného obalu, např. igelitový neporušený obal). Při vyhodnocení je potřeba brát v úvahu teplotu,

při které byla vlhkost stanovena. Průměrné hodnoty vlhkosti zemin jsou uvedeny v tabulce (Tab. 3.4).

**Tab. 3.4 Průměrné hodnoty vlhkosti**

<b>Zemina</b>	<b>Vlhkost [%]</b>
Písek	10 – 24
Jílovité zeminy	24 – 35
Jíl	35 – 50
Bentonit	až 80

Vlhkost lze dále vyjádřit jako poměr objemu pórů vyplněných vodou k objemu pórů sušiny, což je takzvaný **stupeň nasycení** [02] zeminy vodou  $S_r$  a je vyjádřen vztahem:

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} \cdot 100 [\%], \quad (3.3)$$

kde  $V_w$  představuje objem vody a  $V_p$  je objem pórů ve vzorku. Orientační hodnoty pro klasifikaci zemin podle stupně nasycení jsou v tabulce (Tab. 3.5).

**Tab. 3.5 Klasifikace zemin dle stupně nasycení**

<b>Zemina</b>	<b>Stupeň nasycení <math>S_r</math></b>
Suchá	0
Zavhlá	< 0,25
Vlhká	0,25 – 0,80
Velmi vlhká	> 0,80
Nasycená vodou	1,0



## 4 GEOFYZIKÁLNÍ ELEKTRICKÉ METODY

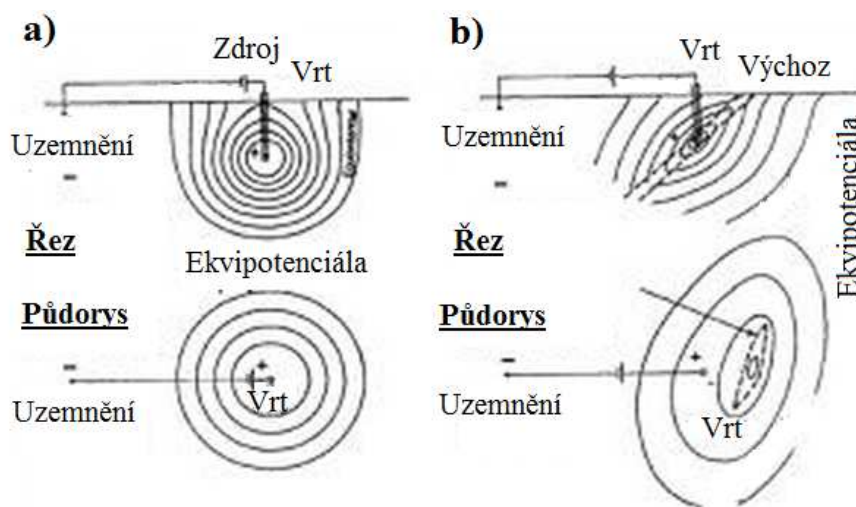
V této kapitole jsou zmíněny vybrané nepřímé elektrické metody využívající, obdobně jako metoda EIS, elektrický signál ke generování elektrického pole a k následné detekci odpovídajících procesů probíhajících ve sledovaném prostředí. Jedná se jen o stručný přehled a uvedení základní charakteristiky metod.

### 4.1 Ekvipotenciální metoda

Ekvipotenciální metoda [08] byla jedna z prvních elektrických metod. Pokud elektrický proud protéká homogenním prostředím mezi dvěma elektrodami, distribuce potenciální energie je ve vybuzeném elektrickém poli rovnoměrná. Nachází-li se v prostředí dobře nebo špatně vodivé prvky, dojde k deformaci elektrického pole. Na základě tohoto poznatku bylo možné teoreticky určit anomální oblasti různých vodivostí. Metoda byla využívána v počátcích geofyziky, ale postupně byla nahrazena modernějšími přístupy.

### 4.2 Mise-à-la-Masse metoda

Mise-à-la-Masse metoda (tzv. vybuzení hmoty) [08] se dodnes uplatňuje v těžebním průzkumu. Při této metodě je využito vodivé hmoty jako jedné elektrody a druhá elektroda je umístěna v zemi ve vzdálenosti minimálně pětkrát větší, než je předpokládaná velikost tělesa. V hornictví může být vodivou hmotou např. minerální těleso. V geotechnických aplikacích může být předmětem šetření například kovové kanalizační potrubí. Na obrázku (Obr. 4.1) jsou znázorněny ekvipotenciály (izolinie spojující místa stejného potenciálu), které se vytvoří kolem elektricky vodivých předmětů.

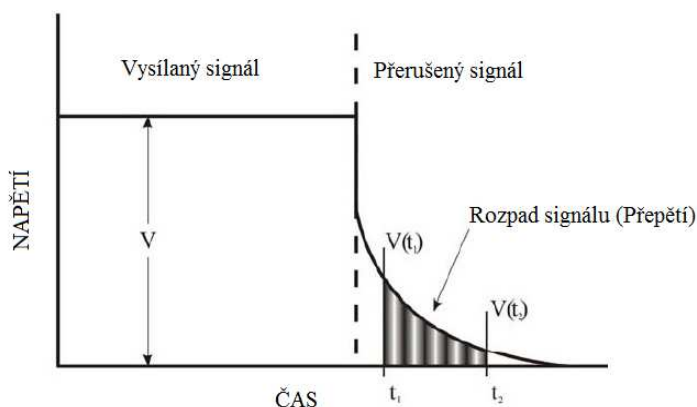


Obr. 4.1 Mise-à-la-Masse metoda: a) el. pole bodu, b) el. pole rudního tělesa

Zdroj: <http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/img/fig266.jpg>

### 4.3 Indukovaná polarizace

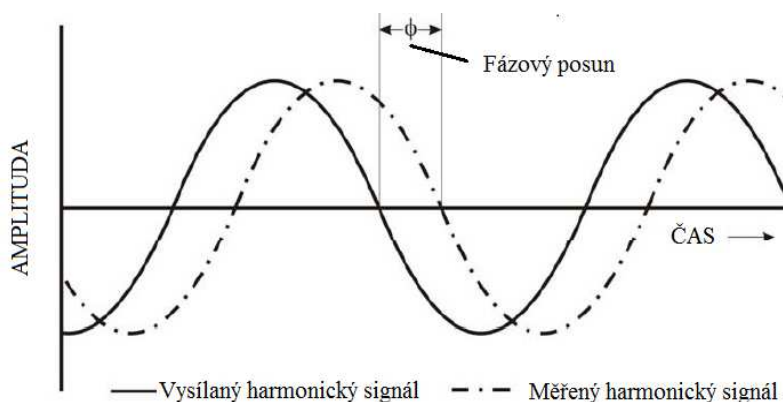
Metoda indukované polarizace (IP) [08] je založena na sledování elektrického potenciálního rozdílu v čase. Potenciální rozdíl mezi elektrodami často nesklesne okamžitě k nule, když je budicí proud, který generuje elektrické pole, vypnut. Typickým průběhem je počáteční prudký pokles měřeného elektrického napětí, za nímž následuje pozvolnější průběh po určitém časovém intervalu, kde sledovaný potenciál klesne na nulovou hodnotu. Tato metoda je široce využívána v průzkumu rudních těles, v ostatních odvětvích je omezena. Na obrázku (Obr. 4.2) je zobrazen průběh stejnosměrného napětí při vypnutí generátoru budicího stejnosměrného elektrického proudu.



Obr. 4.2 IP stejnosměrného proudu

Zdroj: <http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/img/NewImages/Induced%20Polarization/IPTheory.jpg>

Je-li pro generování elektrického pole ve sledovaném prostředí použit harmonický budicí signál, nejčastěji se využívá střídavý proud sinusového průběhu, je možno sledovat fázový posun amplitudy budicího vysílaného (střídavý elektrický proud) a měřicího přijímaného (střídavé elektrické napětí) signálu v čase (Obr. 4.3).



Obr. 4.3 IP střídavého proudu

Zdroj: <http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/img/NewImages/Induced%20Polarization/IPTheory.jpg>

## 4.4 Metoda vlastního potenciálu

Metoda vlastního potenciál (SP) [08] se uplatňuje především v zemědělství. Je založena na měření rozdílů přirozeně existujících elektrických potenciálů, které se obvykle vyskytují mezi jakýmkoli dvěma prvky v půdě nebo mezi půdou a rostlinami. Na základě měření lze následně např. stanovit, jak vhodné vlastnosti má zemědělská půda pro pěstování plodin [09]. V uvedené souvislosti se metodou zabývá například texaská společnost *Landviser, LLC*. Rozdíly potenciálů jsou však velmi malé a v běžné geofyzice se jeví jako šum při měření. Rozdílný elektrický potenciál vzniká v půdách přirozeně v důsledku půdotvorných procesů a voda/iont pohybů. Metoda proto může být použita k detekci místa úniku vody na ponořených svazích zemních hrází apod.

## 4.5 Odporové metody

Odporové metody [08] fungují na principu měření elektrického odporu geologických materiálů. Minerální zrna zemin jsou v podstatě elektricky nevodivá resp. velmi málo elektricky vodivá, s výjimkou některých materiálů, jako jsou kovové rudy. Proto je elektrický odpor zemin určen především množstvím pórů, jejich uspořádáním a obsahem vody v nich. Ke generování budicího elektrického pole metody mohou využívat elektrický proud stejnosměrný (obvyklé v Evropě a Asii) nebo střídavý (především v Americe). Při použití stejnosměrného elektrického proudu přivedeného do země dvěma elektrodami se měří rozdíl potenciálu mezi dvěma dalšími elektrodami [10], ve kterých není proud. Pro měření se používají různé konfigurace i počty elektrod, které mají své výhody i nevýhody. Sondy mohou být různě modifikovány v závislosti pro jaký účel budou využity, ale podstata měření odporu zůstává stejná. Pro zjišťování změny elektrických odporů zemin v závislosti na hloubce se využívá vertikální odporová metoda (VES) a pro horizontální měření například dipólové uspořádání elektrod.

Firmy využívající elektrické odporové metody jsou například *Landviser, LLC*, Skupina společností *Earth Systems*, *G Impuls Praha spol. s r.o.*, *Advanced Geosciences, Inc.* a společnost *IRIS Instruments*.

Do kategorie elektrických odporových metod využívajících střídavý proud patří právě metoda EIS, kterou jsem využil v této práci.

## 5 METODA EIS

Metoda elektrické impedanční spektrometrie (EIS) [11] patří do skupiny nepřímých měřicích metod. Jako zdroj budící energie je využíván harmonický signál sinusového průběhu – střídavý elektrický proud. Každé vodivé prostředí se vyznačuje určitým elektrickým odporem vůči průchodu elektrického proudu. Na základě uvedeného poznatku se dá velmi zjednodušeně metodu označit za metodu popisující elektrický odpor měřeného prostředí. Právě elektrický odpor charakterizuje vlastnosti půd a zemin.

Základní princip metody EIS spočívá v měření frekvenční charakteristiky elektrické impedance  $\mathbf{Z}$  zemin. Elektrickou impedanci  $\mathbf{Z}$  lze vyjádřit pomocí Ohmova vztahu:

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{I}}, \quad (5.1)$$

kde  $\mathbf{Z}$  je fázor elektrické impedance  $[\Omega]$ ,  $\mathbf{U}$  je fázor střídavého napětí  $[\text{V}]$  a  $\mathbf{I}$  je fázor střídavého proudu  $[\text{A}]$ .

Elektrická impedance je komplexní veličina, jejíž frekvenční charakteristiku lze vyjádřit rozložením na jednotlivé složky, a to vztahem:

$$\mathbf{Z} = R + jX, \quad (5.2)$$

kde rezistance  $R$  (elektrický odpor) je reálnou složkou elektrické impedance, která není závislá na frekvenci a  $X$  (reaktance) je imaginární složkou elektrické impedance, která se mění s frekvencí. Při výpočtu se obvykle nepoužívá frekvence  $f$ , ale kruhová frekvence  $\omega$ , která je dána vztahem:

$$\omega = 2\pi \cdot f. \quad (5.3)$$

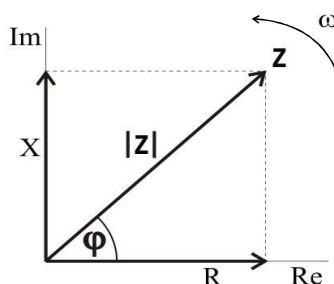
Modul elektrické impedance lze vypočítat pomocí Pythagorovy věty vzorcem:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (5.4)$$

fázový posun je vyjádřen vztahem:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{X}{R}\right), \quad (5.5)$$

elektrickou impedanci je možno graficky znázornit podle obrázku (Obr. 5.1).

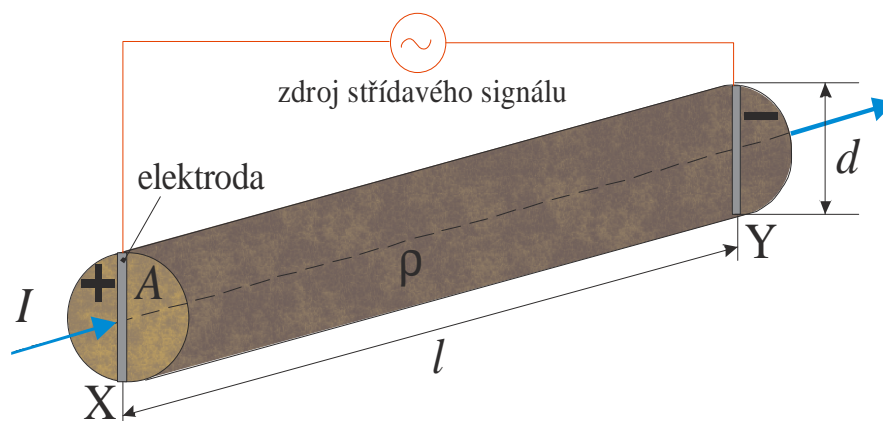


Obr. 5.1 Grafické znázornění fázoru elektrické impedance [11]



## 5.1 Princip měření metodou EIS

Měření elektrické impedance [11] vychází z paralelního umístění dvou elektrod do zeminy v určité vzdálenosti  $l$ . Elektrody délky  $d$  tvoří jeden snímač sondy EIS. Střídavý elektrický proud s hustotou  $J$  procházející zeminou mezi elektrodami v ní generuje elektrické pole intenzity  $E$ . Zemina však průchodu elektrického proudu klade elektrický odpor, což vyjadřují měřené složky elektrické impedance  $Z$ .



Obr. 5.2 Zemina jako elektrický vodič [11]

Zemina se obecně považuje za špatný elektrický vodič, takže u suché zeminy bude reálný elektrický odpor velký. Bude-li naopak zemina vlhká nebo v ní budou póry s obsahem vody, elektrický odpor bude menší a zemina povede lépe elektrický proud. Stane se tak elektrickým vodičem [11], jehož plocha  $A$  je určena délkou elektrod  $d$  (Obr. 5.2). Protéká-li elektrický proud  $I$  o dané hustotě  $J$  plochou  $A$  je možno odvodit následující vztah:

$$I = \iint_A J dA . \quad (5.6)$$

Konstrukce dělené sondy umožňuje definovat vlastnosti jednotlivých vrstev zeminy. Každá elektroda sondy snímá jen určitý průřez, tím se dají podrobněji zjistit změny elektrické charakteristiky (např. elektrická vodivost) zeminy.

Pomocí inženýrskogeologického a hydrogeologického průzkumu je možno získat podrobné informace o měřeném prostředí. Na základě zjištění lze navrhnout různé konstrukce měřicích sond. Měření je možno realizovat na jedné dělené tyčové sondě (nezbytné je využití adaptéru), nebo jako párové zapojení dvou elektrod, které jsou umístěny v určité vzájemné vzdálenosti (vzdálenost by v zeminách neměla být větší než 2 m).

## 6 PŘÍSTROJ Z-METR III

Přístroj Z-metr III [11] byl zkonstruován pro měření elektrické impedance prostředí zemin metodou EIS. Základní stavba měřicí aparatury se skládá z měřicího přístroje, zdroje elektrického střídavého proudu a elektrických sond s kabely.

Z-metr III (Obr. 6.1) je již třetí generací přístroje navrženého a realizovaného řešením mezinárodních projektů v programu EUREKA. Oproti svým předchůdcům byla jeho velikost několikanásobně zmenšena, takže je vhodný na terénní výzkum. Práce s ním je velmi jednoduchá a komfortní. Tento přístroj je snadno přenosný, proto má velké uplatnění při větším počtu měřicích míst. Z-metr III byl použit pro experiment, kterým se zabývá má práce.



Obr. 6.1 Přístroj Z-metr III

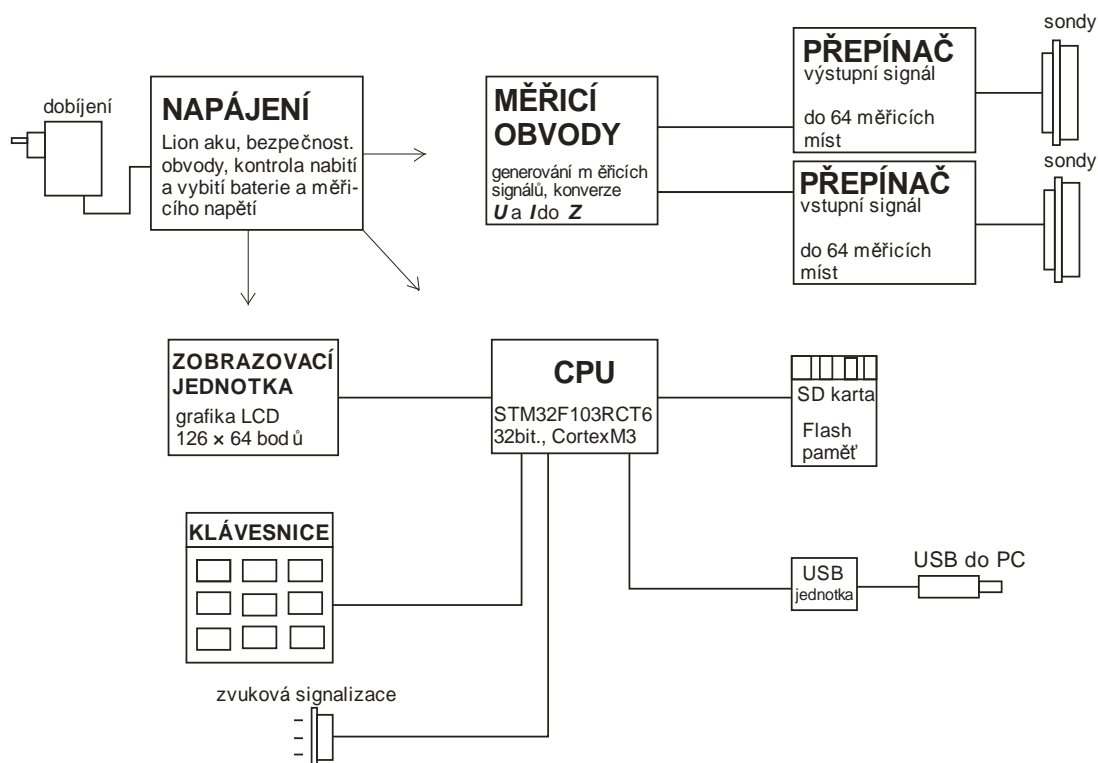
Rozměry přístroje si vyžádaly jistá omezení. Ústřední jednotkou se stal 32 bitový procesor, který umožňuje pouze dvousvorkové a třísvorkové měření. Jedná se o verzi signálového procesoru vyrobeného firmou ST Microelectronics. Jelikož je přístroj přenosný, v jeho těle je integrována baterie s 8 hodinovou dobou provozu. Baterii je možno dobýt pomocí 12 V zdroje. Pro komunikaci s uživatelem má Z-metr III LC display a klávesnici se základními ovládacími tlačítky. Záznam měření je ukládán na přenosnou SD kartu v podobě textových souborů. Karta obsahuje licenční soubor, který současně slouží jako hardwarový klíč proti zneužití. Další možností získání dat je připojení přístroje přes rozhraní USB k počítači. Přístroj měří elektrickou impedanci zemin ve formě její reálné

(rezistance  $R$ ) a imaginární složky (reaktance  $X$ ). Základní parametry jsou uvedeny v tabulce (Tab. 6.1).

Tab. 6.1 Parametry Z-metru III

Parametr	Z-metr III	Parametr	Z-metr III
<b>Impedanční rozsah</b>	100 $\Omega$ – 1 M $\Omega$	<b>Komunikační rozhraní</b>	USB, SD karta
<b>Frekvenční rozsah</b>	1 kHz – 100 kHz	<b>Počet měřicích míst</b>	1, 8, 16, 32, 64, 128
<b>Přesnost měření modulu <math> Z </math></b>	$\pm 2\%$ z rozsahu	<b>Přepínač</b>	interní, externí
<b>Přesnost měření fáze</b>	$\pm 2^\circ$	<b>Napájení</b>	baterie

Základní koncepce a konstrukční řešení Z-metru III je znázorněno na blokovém schématu na obrázku (Obr. 6.2).

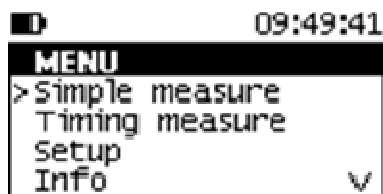


Obr. 6.2 Blokové schéma Z-metru III [11]

## 6.1 Nastavení parametrů měření

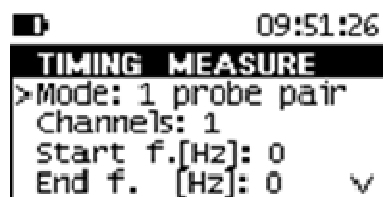
Ovládání přístroje bych přirovnal k ovládání mobilního telefonu, takže pro uživatele je velice přehledné a jednoduché. Před vlastním měřením je důležité se seznámit s nastavením jednotlivých parametrů [12] pro uskutečnění daného experimentu. Na obrázcích níže je zobrazeno menu přístroje s jednotlivými kroky pro zahájení měření.

Po stlačení tlačítka ON se zobrazí hlavní menu (Obr. 6.3) s možnostmi: Simple measure (jednorázové měření), Timing measure (časované měření), Setup (nastavení), Info (informace o přístroji), Service (servisní funkce) a Switch off (vypnutí přístroje).



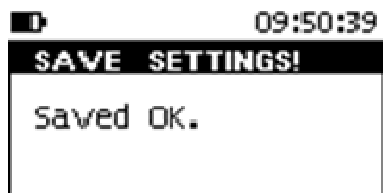
Obr. 6.3 Hlavní menu [12]

Pro mnou navržený experiment zvolím časované měření (Obr. 6.4). Zde nastavím jednotlivé parametry měření: Mode (režim měření – 1 probe pair (párová sonda) / single probe (jedna sonda)), Channels (počet kanálů), Start f.(výchozí frekvence), End f.(cílová frekvence), Step f. (frekvenční přírůstek), Settling (zpoždění mezi zahájením měření a skutečným sejmutím naměřené hodnoty – eliminace přechodových vlivů), Delay (zpoždění mezi jednotlivými měření) a Count (počet opakování měření).



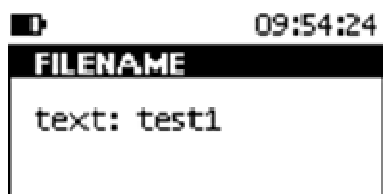
Obr. 6.4 Menu časovaného měření [12]

Po nastavení parametrů uložím nastavení (Obr. 6.5) a spustím měření označením Measure!.

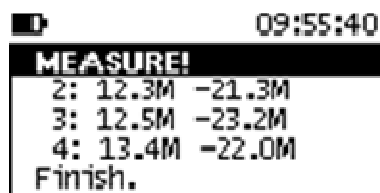


Obr. 6.5 Uložení nastavení [12]

Nyní jsem vyzván k zadání názvu datového souboru (Obr. 6.6). Název se zadává jako na mobilním telefonu pomocí opakovaného mačkání alfanumerické klávesy. Datový soubor v textovém editoru bude obsahovat data mnou zvoleného měření. Po stisknutí tlačítka OK bude zahájeno měření. Průběh měření je zobrazen na obrazovce přístroje (Obr. 6.7), takže již během měření získám obecný přehled o průběhu měření.



Obr. 6.6 Název datového souboru [12]



Obr. 6.7 Průběh měření [12]

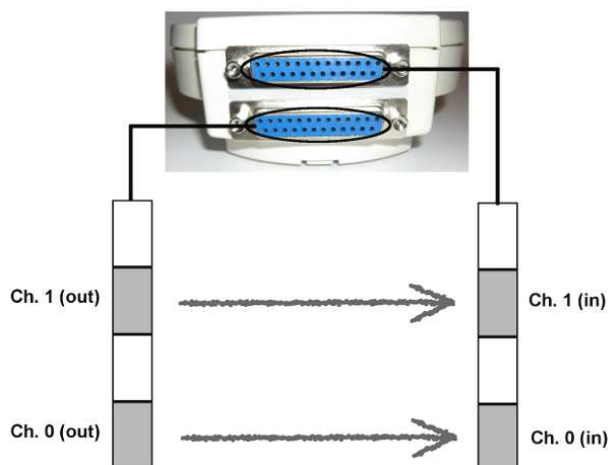
Po dokončení měření jsou data uložena v podobě textového souboru. Po nahrání dat do počítače lze textový soubor otevřít například v programu Poznámkový blok. Ukázka výstupního souboru je zobrazena na obrázku (Obr. 6.8).

No	f [Hz]	date [dd.mm.yyyy]	time [hh:mm:ss]	ch	range	Rx [ohm]	Xx [ohm]
1	8000	1.3.2012	11:43:30	0	4	593875.2	-1526027.7
2	8000	1.3.2012	11:43:31	1	4	634380.3	-1542995.5
3	8000	1.3.2012	11:43:31	2	4	641757.9	-1589916.8
4	8000	1.3.2012	11:43:32	3	4	679696.8	-1675904.0
5	8000	1.3.2012	11:43:32	4	4	632903.2	-1465253.1
6	8000	1.3.2012	11:43:33	0	4	557516.5	-1414724.5
7	8000	1.3.2012	11:43:34	1	4	595078.6	-1432179.1
8	8000	1.3.2012	11:43:34	2	4	557361.0	-1361953.8
9	8000	1.3.2012	11:43:35	3	4	581674.4	-1490687.5
10	8000	1.3.2012	11:43:35	4	3	278078.0	-695637.1

Obr. 6.8 Ukázka výstupního textového souboru

Na horní liště programu je zobrazen název textového souboru. Textový soubor obsahuje následující data: No (číslo jednotlivých měření), f [Hz] (použitá frekvence měření), date (datum měření), time (čas měření), ch (měřený kanál), range (měřicí rozsah přístroje), Rx (hodnota reálné složky impedance) a Xx (změřená hodnota imaginární složka impedance). Vzor výstupního souboru je v příloze (PŘÍLOHA 1).

Před spuštěním měření je samozřejmě nejprve nutno připojit příslušnou měřicí sondu. Na těle Z-metru III jsou k dispozici dva konektory typu CANON 25 PIN. Horní konektor je výstupní. Signál je potom přijímán spodním vstupním konektorem, viz obrázek (Obr. 6.9).



Obr. 6.9 Konektory pro připojení sondy [12]



## 7 EXPERIMENT

Cílem mé práce bylo provést experiment, který se zabývá vlivem vrstvy obsypového materiálu na citlivost měření metodou EIS. Experiment jsem provedl v laboratoři Ústavu vodních staveb, kde byly vhodné podmínky a zázemí pro jeho provedení. K dispozici jsem měl měřicí přístroj Z-metr III s párovou sondou. Jako výchozí materiál jsem použil písek, který představoval měřené prostředí. Pro můj pokus jsem využil 4 druhy obsypového materiálu. Každý obsypový materiál jsem aplikoval okolo elektrod sondy ve dvou různých silných vrstvách. Porovnáním hodnot měření písku a písku s obsypovými materiály jsem se snažil zjistit, který ze čtyř vzorků by mohl být vhodný jako obsypový materiál zajišťující kontakt sond s měřeným prostředím při využití metody EIS v praxi při terénních měřeních v písčitých zeminách. Právě porovnáním jednotlivých měření jsem se snažil najít takový materiál, jehož naměřené hodnoty by měly stejný nebo podobný průběh jako hodnoty výchozího měřeného prostředí (v tomto případě bratčický písek). Dále jsem se snažil zjistit jaký vliv má mocnost vrstvy obsypu na dané měření.

### 7.1 Příprava experimentu

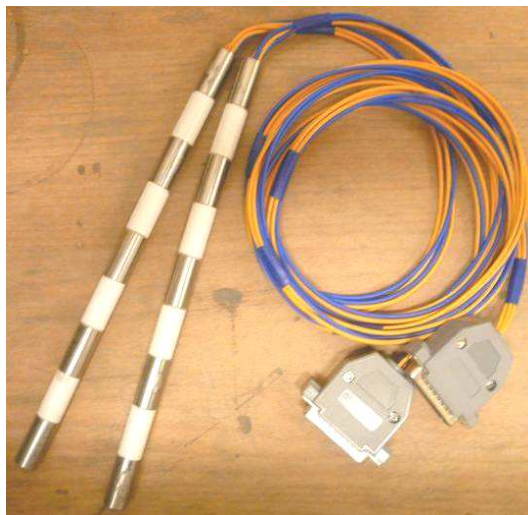
Před zahájením experimentu jsem si musel nejprve připravit veškeré pomůcky a náležitosti pro jeho uskutečnění. Nejprve jsem si vypracoval metodiku experimentu, která je popsána v kapitole 7.4. Na základě tohoto postupu jsem si připravil následující příslušenství:

#### **Z-metr III s párovou sondou**

Přístroj Z-metr III je popsán v kapitole 6. Informace o měření však zprostředkovává měřicí čidlo resp. měřicí sonda. Pro experiment jsem proto navrhl a nechal zhotovit párovou pasivní sondu, která se skládá ze dvou částí tvaru tyče. Každá tyč obsahuje 5 elektrod, které jsou odděleny vzájemně izolovanými částmi. Jedná se o párovou sondu, což znamená, že každý snímač, tvořený jednou elektrodou na jedné a druhé tyči, budí v daném profilu definované elektrické pole a stejný snímač ve stejném profilu následně přijímá měřený signál. Pomocí této sondy lze měřit na 5 kanálech. Navržená sonda je na obrázku (Obr. 7.1), její rozměry jsou uvedeny v tabulce (Tab. 7.1). Celková hmotnost párové sondy je 0,247 kg.

**Tab. 7.1 Párová sonda - vlastnosti**

<b>Počet sond</b>	2 ks (párová sonda)	<b>Výška elektrody</b>	$2,58 \cdot 10^{-2}$ m
<b>Celková délka sondy</b>	0,232 m	<b>Počet izolantů na sondě</b>	4
<b>Průměr sondy</b>	$1,25 \cdot 10^{-2}$ m	<b>Výška izolantu</b>	$2,55 \cdot 10^{-2}$ m
<b>Počet elektrod na sondě</b>	5	<b>Konec sondy (výška izolantu)</b>	$1 \cdot 10^{-3}$ m



**Obr. 7.1 Párová sonda**

### Válcová nádoba

Pro experiment jsem zhotovil nádobu, která vymezovala měřené prostředí. Nádobu jsem navrhl na základě výšky párové sondy. Jelikož je horní část sondy ukončena elektrodou, musí být tato elektroda v celé své výšce zasypána zeminou, proto jsem vnitřní výšku nádoby volil cca o 0,03 m větší než je výška sondy. Nádoba o hmotnosti 2,415 kg má tvar válce o vnitřním průměru  $d = 0,251$  m a výšce  $v = 0,243$  m. Vyrobená je z tvrdého plastu, novodurové dno je přilepené.

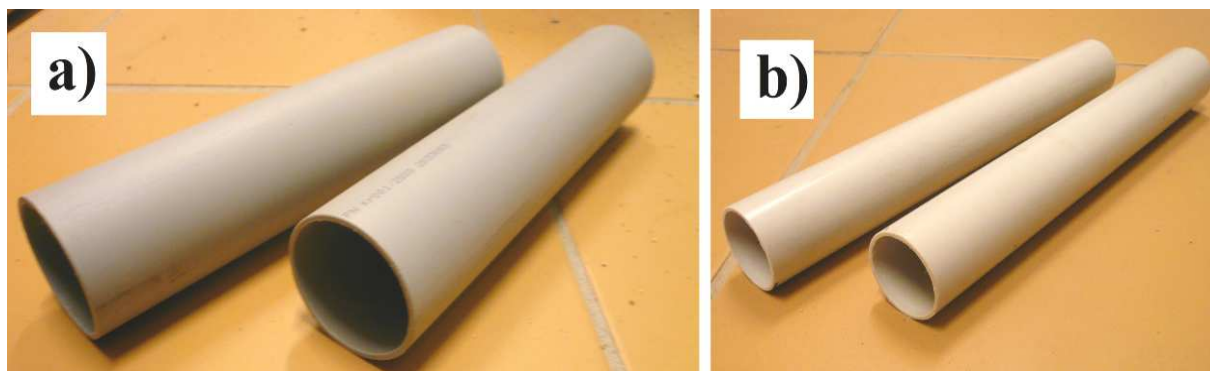


**Obr. 7.2 Válcová nádoba**

### Plastové trubky pro obsyp

Z důvodu rovnoměrnosti vrstvy obsypu sond jsem pro vymezení tloušťky vrstvy obsypového materiálu použil plastové trubky (Obr. 7.3). Do trubic jsem nejprve vždy vložil sondy a následně je obsypal daným vzorkem obsypového materiálu.

Nařezal jsem dva páry stejně dlouhých trubek o různých průměrech. Rozměry a hmotnosti trubek jsou uvedeny v tabulce (Tab. 7.2).



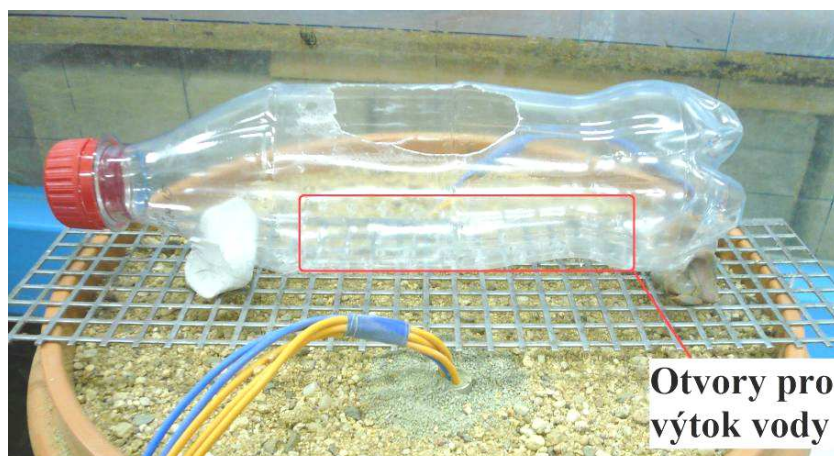
Obr. 7.3 Plastové trubky pro obsyp - a) DN50, b) DN32

Tab. 7.2 Hmotnost a rozměry plastových trubek

Typ trubky	DN50	DN32
Hmotnost [kg]	0,11	0,05
Délka [m]	0,231	0,231
Vnitřní průměr [m]	0,046	0,028
Vnější průměr [m]	0,050	0,032

### Upravená PET láhev pro přívod vody

Z hlediska měření bylo nutné zajistit, aby byl povrch materiálu (zejména mezi sondami) rovnoměrně smáčen vodou. Z tohoto důvodu jsem upravil plastovou láhev o objemu 0,5 litru. Z jedné strany jsem v lahvi vyřízl otvor cca  $0,10\text{ m} \times 0,05\text{ m}$ , který sloužil pro nalévání vody. Naproti vyříznutému otvoru jsem udělal rovnoměrné pole malých otvorů (cca 1 mm až 2 mm), kterými voda rovnoměrně stékala na povrch zeminy. Uvedeným způsobem jsem upravenou láhev (Obr. 7.4) položil na plechovou mříž, která byla umístěna na válcovou nádobu. Pro zajištění stability lahve jsem použil plastickou hmotu.



Obr. 7.4 Upravená PET láhev pro přívod vody

### Měřič vlhkosti a teploty

Pro měření vlhkosti a teploty jsem použil multimetr Testo 454 (Obr. 7.5). Přístrojem jsem měřil vlhkosti a teploty jednotlivých měřených materiálů a prostředí, ve kterém jsem pracoval. Hodnoty slouží pro popis referenčních podmínek měření metodou EIS, neboť obě veličiny mají vliv na hodnoty sledované elektrické impedance.

Multimetr Testo 454 se skládá z tyčového snímače a hlavní jednotky s displejem. Na hrotu snímače jsou umístěny elektrické měřicí obvody, které jsou chráněny speciální korunkou se závitem. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny na displeji. Přístroj umožňuje i vytisknout naměřená data, neboť obsahuje integrovanou tiskárnu. V mém experimentu jsem hodnoty odečítal přímo z displeje a zaznamenával je do zápisníku.



Obr. 7.5 Multimetr Testo 454

## Váhy pro měření hmotnosti materiálů

Pro zjištění hmotnosti materiálů a komponentů jsem použil dva typy vah. Obsypový materiál a komponenty (válcová nádoba, sondy, plastové trubky) jsem vážil pomocí digitální váhy Sartorius (Obr. 7.6a), která váží s přesností na desetiny gramů do maximální hmotnosti 5 kg. Jelikož jsem v experimentu potřeboval zjistit váhu nádoby naplněné pískem o vyšší hmotnosti, použil jsem váhu decimální (Obr. 7.6b), která váží s přesností na 0,1 kg a její váživost je do 250 kg.



Obr. 7.6 Váhy: a) digitální, b) decimální

## Ostatní pomůcky

Pro experiment jsem dále potřeboval **svinovací metr** a **lihový fix** pro stanovení přesných pozic sond, aby byly při každém měření jejich vzdálenosti stejné. **Odměrku na vodu**, pro stanovení přesného množství vody, které jsem při všech variantách experimentu naléval do válcové nádoby se zeminou. Veškeré poznámky o průběhu experimentu jsem si zaznamenával do **zápisníku**. Pro experiment jsem používal stále stejné množství písku z lokality Bratčice. Aby byly všechny varianty experimentu vzhledem ke zkoumané zemině jednoznačné, po každém měření jsem písek vysušil ve **vysoušecí peci**. Vysušený písek jsem využíval pro další měření.

## 7.2 Výchozí materiál pro měření

Jako výchozí materiál pro měření jsem použil modifikovaný bratčický písek, dále označený jako písek Bratčice (Obr. 7.7), který byl k dispozici v laboratoři Ústavu vodních staveb. Tento materiál tvořil měřené prostředí, ve kterém byla umístěna párová sonda obsypaná vrstvami různých obsypových materiálů (kapitola 7.3). Pro prostředí tvořené jen bratčickým pískem (bez obsypu sondy) jsem použil jako výchozí prostředí, s kterým jsem následně porovnával prostředí tvořená pískem s obsypovými materiály.





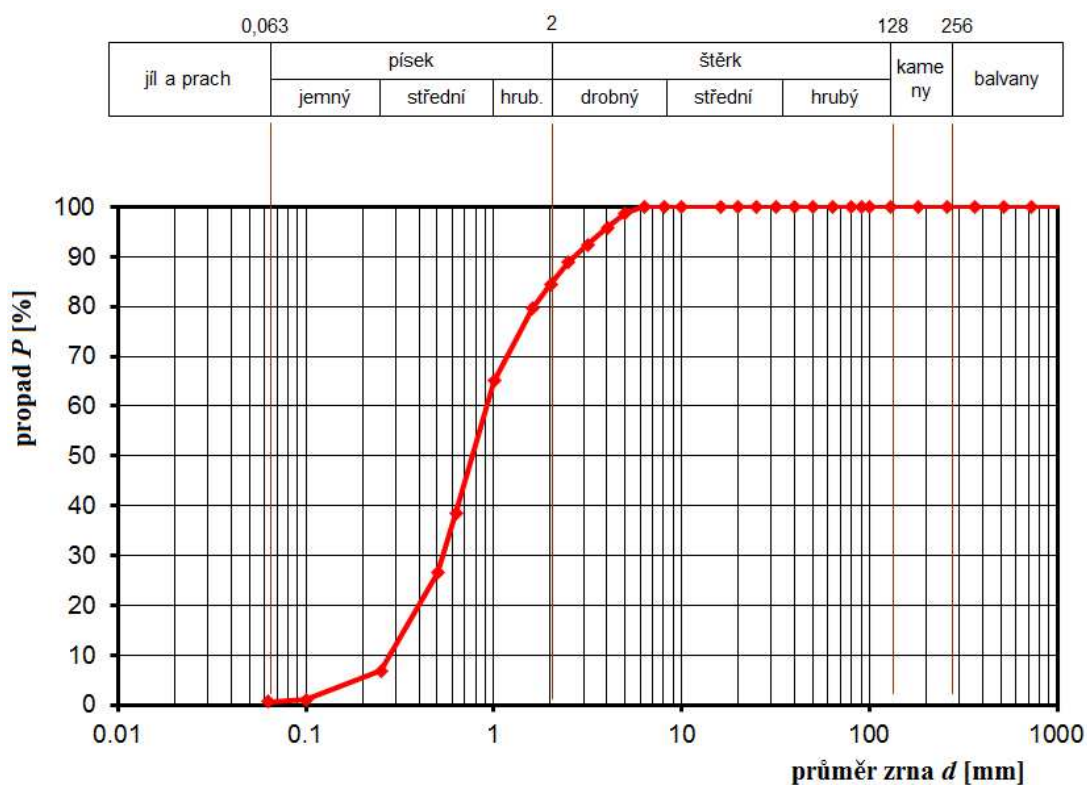
**Obr. 7.7 Modifikovaný písek Bratčice**

Pro identifikaci písku jsem granulometrický rozbor. Pro rozbor jsem použil vzorek o hmotnosti 3,275 kg. Zastoupení jednotlivých frakcí vzorku jsem určil síťovým rozbořem. Granulometrie vzorku písek Bratčice je znázorněna pomocí křivky na obrázku (Obr. 7.8) a zastoupení složek zeminy ve vzorku v tabulce (Tab. 7.3).

Průměr efektivního zrna jsem stanovil  $d_{ef} = 1,2$  mm dle vzorce podle Kramera:

$$d_{ef} = 0001 \sum_{i=0}^{100} d_i \cdot m_{pi\%} \quad (7.1)$$

kde  $m_{pi\%}$  je hmotnostní podíl zrn velikosti  $d_i$  z celkového vzorku.



**Obr. 7.8 Granulometrická křivka vzorku písek Bratčice**

**Tab. 7.3 Písek Bratčice – zastoupení složek zeminy ve vzorku**

jíl a prach	písek			štěrk			kameny	balvany
	jemný	střední	hrubý	drobný	střední	hrubý		
0,6 %	83,9 %			15,5 %			0 %	0 %
	6,3 %	58,1 %	19,5 %	15,5 %	0 %	0 %		

### 7.3 Obsypové materiály

Pro můj experiment byly pro obsyp použity 4 vzorky materiálu, které bezplatně poskytla společnost KERAMOST, a.s. Tato společnost je významným českým výrobcem nerostných nemetalických surovin.

Experiment jsem provedl ve variantách s následujícími materiály:

- Ekobeton A+B,
- PN-3 (těžený jíl),
- W-extra-J-SV (těžený jíl),
- kaolin Rokle.

#### **Ekobent A+B**

Ekobeton (Obr. 7.9) [13] je jemnozrnný bentonitový přípravek se širokou škálou použitelnosti v ekologické, zemědělské, stavební a vodohospodářské činnosti. Podstatu zásypu tvoří přírodní bentonit charakteristický vysokým obsahem montmorillonitu – aktivního minerálu určujícího jeho vlastnosti:

#### *Sorpční schopnost k zachycení*

- pachů, par a vzdušné vlhkosti,
- rozlitých olejů a jiných tekutin,
- tekutých podílů z podestýlek hospodářských zvířat.

#### *Rekultivační schopnost*

- k zúrodnování písčitých půd a povrchů např. výsypek díky schopnosti zadržet vláhu a živiny v kořenové vrstvě půdy,
- jako přísada do minerálních hnojiv, kde brání jejich průsaku do podorničí a zároveň zamezuje krustování hnojiva při skladování,
- k vyvážení vlhkostního režimu zeminových substrátů pro pěstování rostlin.

#### *Těsnicí schopnost*

- K utěsnění staveb a vodních nádrží (studny, jímky) proti průniku povrchových vod.
- K utěsnění hrází a drobných průsakových trhlin nádrží proti úniku vod.
- K zajištění nepropustnosti podloží parkovacích, skladovacích a montážních ploch s možným nebezpečím úniku škodlivin do spodních vod.



**Obr. 7.9 Ekobeton A+B**

Technické parametry (Tab. 7.4) a chemické složení (Tab. 7.5) tohoto materiálu jsou uvedeny v následujících tabulkách. Chemické složení se týká obecně bentonitových přípravků, mezi které se Ekobeton A+B řadí.

**Tab. 7.4 Ekobeton A+B – technické parametry [13]**

Název	Obsah montmorillonitu [%]	Vlhkost [%]	Zrnitost [mm]	pH
<b>Ekobeton A</b>	min. 60	3 - 7	0,5 - 2	7,5 - 9,5
<b>Ekobeton B</b>	min. 60	3 - 7	0 - 2	7,5 - 9,5

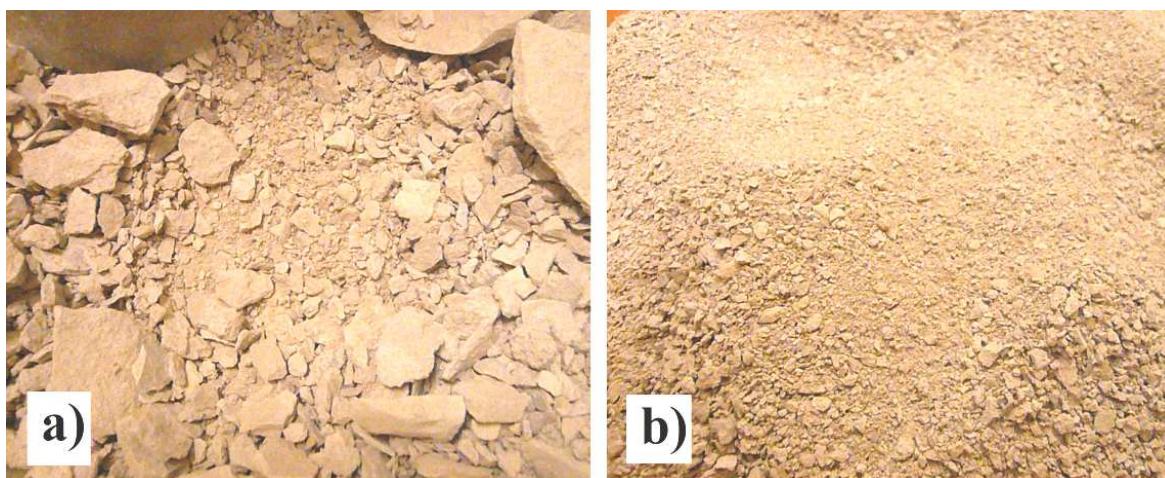
**Tab. 7.5 Ekobeton A+B – průměrné chemické složení bentonitových přípravků [13]**

Název	Obsah [%]	Název	Obsah [%]
<b>montmorillonit</b>	65,0 – 80,0	<b>CaO</b>	1,7 – 3,1
<b>SiO<sub>2</sub></b>	50,0 – 57,0	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,1 – 0,4
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	15,7 – 17,3	<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,3 – 1,2
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	8,8 – 17,3	<b>Li<sub>2</sub>O</b>	0,1
<b>FeO</b>	0,1 – 1,0	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,1
<b>TiO<sub>2</sub></b>	3,8 – 6,3	<b>H<sub>2</sub>O+</b>	5,3 – 6,3
<b>MnO</b>	0,1 – 0,3	<b>MgO</b>	2,5 – 3,5

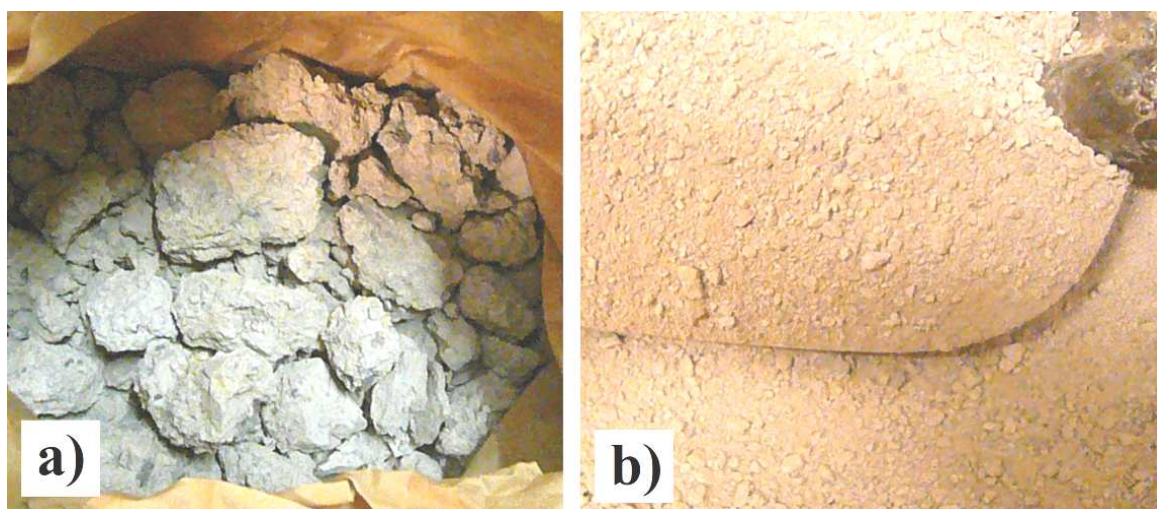
### **Těžené jíly PN-3 a W-extra-J-SV**

Jíly, které jsou využívány v ČR, byly před miliony let ukládány na dno pravěkého moře, které se rozprostíralo v oblasti středočeské křídové tabule. Tyto jíly [13] jsou těženy povrchovým způsobem a následně upravovány pro získání různých vlastností. Mezi typické vlastnosti patří zejména vysoká žáruvzdornost, malá až střední plasticita a světlé zbarvení při pálení. Vzhledem k relativně vysokému obsahu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nízkému obsahu železa, obecně

vysokým obsahem jílových minerálů a většinou také malým obsahem organických příměsí, jsou vhodné pro výrobu lupků, jako součást pracovních hmot žáruvzdorného zboží umožňujících rychlovýpal. Některé z nich se hodí i pro jednožárovou výrobu póroviny a také pro sanitární keramiku, obklady a dlažbu. Díky jemnému mletí se významně rozšiřuje spektrum využití. Pro můj experiment byly použity těžené jíly PN-3 (Obr. 7.10) a W-extra-J-SV (Obr. 7.11). Oba tyto materiály obsahovaly i velmi hrubou frakci, proto jsem musel před zahájením experimentu pomocí síta a někdy i drcení oddělit frakce hrubší než 5 mm. Technické parametry (Tab. 7.6), chemické složení (Tab. 7.7) a využití (Tab. 7.8) těžených jílů jsou uvedeny v tabulkách.



Obr. 7.10 PN-3 S5 08: a) hrubá frakce, b) frakce do 5 mm



Obr. 7.11 W-extra-J-SV: a) hrubá frakce, b) frakce do 5 mm

Tab. 7.6 Těžené jíly – chemické složení [13]

Název	PN-3	W-extra-J-SV	Název	PN-3	W-extra-J-SV
SiO <sub>2</sub> [%]	62 – 68	50 – 55	Na <sub>2</sub> O [%]	0,1	0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	27	41	Jílové minerály [%]	65	90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0,6 – 1,5	2	Křemen [%]	30	1 – 5
TiO <sub>2</sub> [%]	1,5	1,6	Živec [%]	-	-
CaO [%]	0,2	0,1	Karbonáty [%]	< 0,1	< 0,1
MgO [%]	0,1	0,2	Org. látky [%]	0,3 – 0,6	1
K <sub>2</sub> O [%]	0,3	0,8			

Tab. 7.7 Těžené jíly – technické parametry [13]

Název	PN-3	W-extra-J-SV	Název	PN-3	W-extra-J-SV
Ztráta žháním [%]	9 – 11	12 – 14	Zbytek na síť 0,09 mm [%]	19 – 33	1,2
Zrnitost > 63 μm [%]	26,6	1,7	Zbytek na síť 0,063 mm [%]	20 – 37	1,7
Zrnitost 63-40 μm [%]	6	0,1	Smrštění sušením [%]	2 – 3	3
Zrnitost 40-20 μm [%]	10	6,1	Pevnost v ohybu po vysušení	0,3	0,5
Zrnitost 20-10 μm [%]	5,5	10,1	Žáruvzdornost	169	175
Zrnitost 10 – 4 μm [%]	9,4	21	Smrštění celkové [%]	4 – 6	11 – 12
Zrnitost 4 – 2 μm [%]	9,3	17,1	Nasákavost varem [%]	14 – 16	8 – 9
Zrnitost < 2 μm [%]	33,2	43,9	Stupeň plasticity	2 – 2,5	2,8 – 3,4
Zbytek na síť 2 mm [%]	0,5	-	Stupeň jemnosti jílových minerálů	3,4	3,5

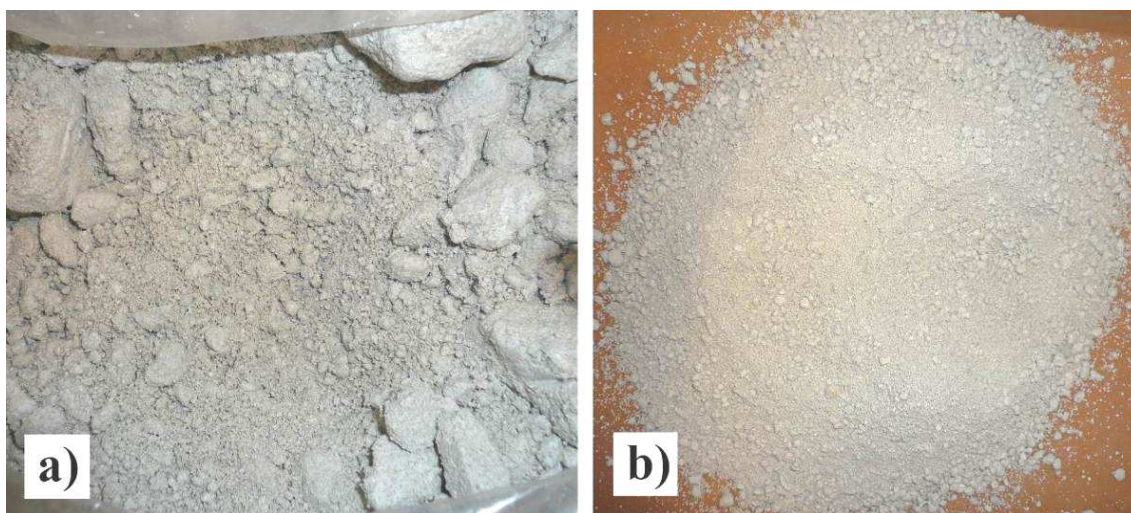
Tab. 7.8 Těžené jíly - využití [13]

Název	PN-3	W-extra-J-SV	Název	PN-3	W-extra-J-SV
Sanita	ne	ne	Keramika	ne	ano
Obklady jednožár	ne	ne	Šamot	ano	ano
Obklady dvojžár	ne	ne	Sádrokarton	ne	ne
Dlažby 3 – 5 %	ne	ne			



## Kaolin Rokle

Kaolin (Obr. 7.12) [13] je ušlechtilá světle zbarvená nebo bílá zemina. Své využití má ve stavebnictví, keramickém, gumárenském, chemickém a zejména v papírenském průmyslu. Jeho typickou vlastností je nízká abraze a vysoká bělost. Tato surovina se vyznačuje vysokým obsahem jílových minerálů, a to zejména kaolinitu. Vedle kaolinitu obsahuje vždy křemen, slídy, živce, další jílové minerály a jiné látky podle povahy mateřské horniny. Pro práci s tímto materiálem jsem sítem oddělil frakci do 5 mm, kterou jsem následně využíval pro experiment. Technické parametry (Tab. 7.9) a chemické složení (Tab. 7.10) kaolinu Rokle jsou uvedeny v následujících tabulkách.



Obr. 7.12 Kaolin Rokle, a) hrubá frakce, b) frakce do 5 mm

Tab. 7.9 Kaolin Rokle – technické parametry [13]

Název	Kaolin Rokle	Název	Kaolin Rokle
<b>Abraze [AT 1000 mg]</b>	max. 15	<b>Specifický povrch Sg [m<sup>2</sup>/g]</b>	10,7
<b>Vlhkost [%]</b>	max. 12	<b>Velikost částic &lt; 2 μm [%]</b>	-
<b>pH</b>	6,5 – 8,5	<b>Zrnitost &gt; 0,045 mm [%]</b>	max. 0,05
<b>Zrnitost &lt; 2 mm [%]</b>	min. 50	<b>Ztráta žíháním 900°C [%]</b>	12, 6
<b>Abraze [AT 1000 mg]</b>	max. 15	<b>Bělost (R 457 % abs.)</b>	min. 79

Tab. 7.10 Kaolin Rokle - chemické složení [13]

Název	Kaolin Rokle	Název	Kaolin Rokle
<b>SiO<sub>2</sub> [%]</b>	47,6	<b>MgO [%]</b>	0,2
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [%]</b>	36,7	<b>K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub> [%]</b>	1,3
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [%]</b>	1,2	<b>CaO [%]</b>	0,1
<b>TiO<sub>2</sub> [%]</b>	0,4		

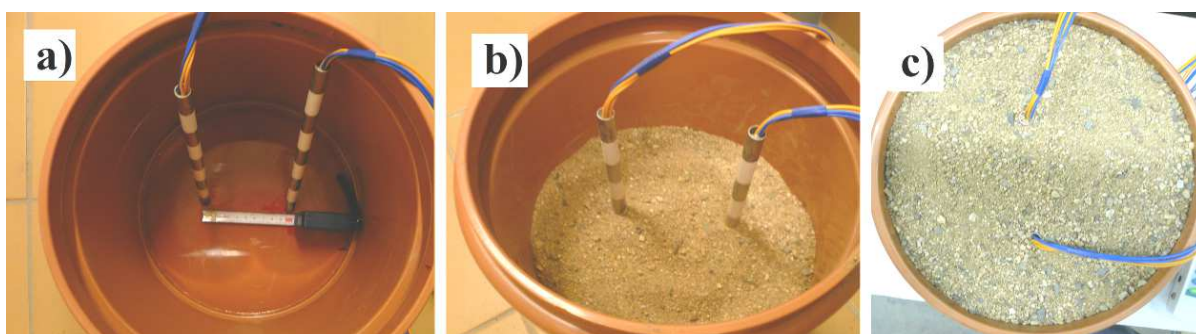


## 7.4 Postup při experimentu

Prvním krokem mého experimentu bylo označení si pozic umístění měřicích sond na dno válcové nádoby. Pomocí fixu jsem si naznačil 2 středové kříže s osovou vzdáleností 0,10 m. Osy sond procházely středy křížů. Následně jsem veškeré pomůcky samostatně zvažil na digitální váze.

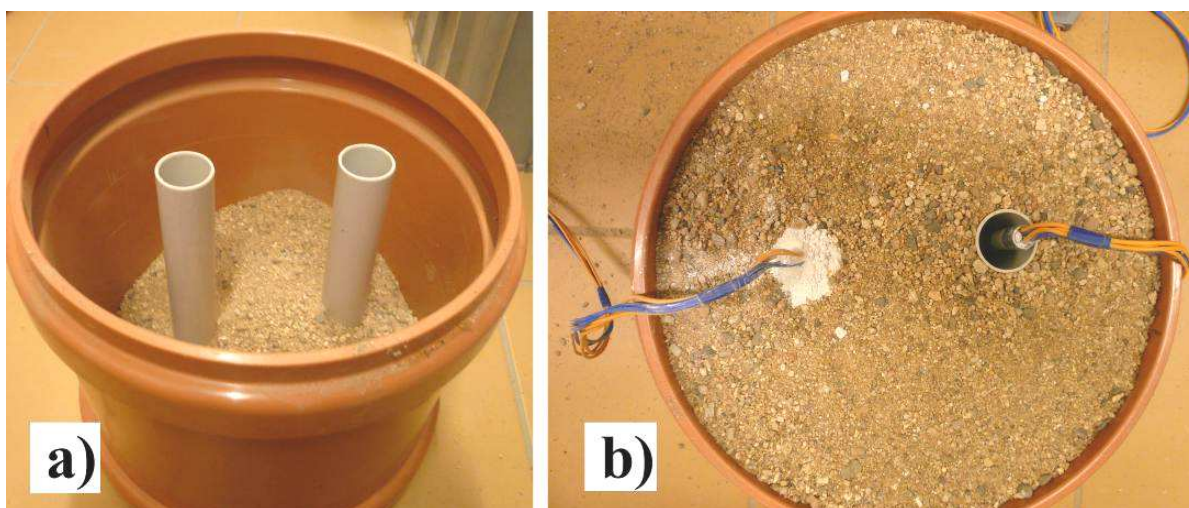
Před zahájením každého měření jsem si pomocí multimetru změřil a zaznamenal teplotu a vlhkost vzorku písek Bratčice a použitého obsypového materiálu.

Pro měření výchozího prostředí (jen písek Bratčice) jsem sondy umístil na kříže a postupně jsem je zasypával bratčickým pískem do úrovně posledního tj. 5 snímače (Obr. 7.13).



Obr. 7.13 Umístění sond

Pro měření s obsypem jsem postupoval obdobně. Na označené středové značky jsem variantně umístil pár plastových trubek. Podélné osy trubek procházely středy křížů. Následně jsem z vnější strany zasypal zeminou. Do trubek jsem umístil sondu (podélná osa sondy byla totožná s podélnou osou trubky) (Obr. 7.14a).

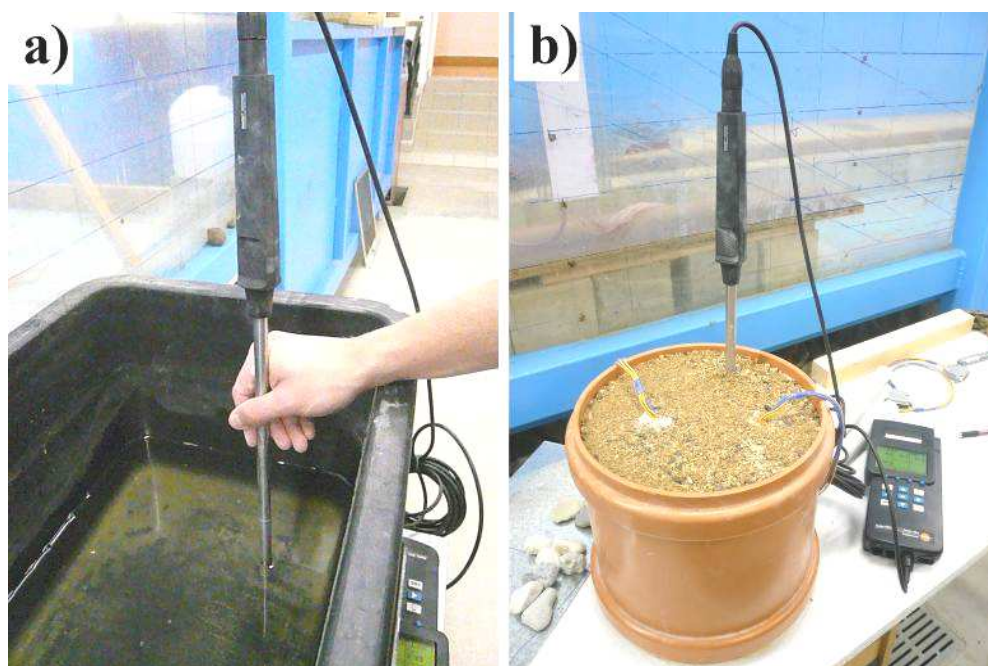


Obr. 7.14 Umístění sond s obsypem

Nyní bylo potřeba nasypat materiál okolo sond. Nejprve jsem z daného materiálu odstranil jeho frakci větší než 5 mm (pokud to struktura materiálu vyžadovala). Následně

jsem materiál zvážil a nasypal okolo sond do úrovně nasypané zeminy (Obr. 7.14b). Po mírném zhutnění zeminy i obsypového materiálu dusáním jsem vyjmul plastové trubky. Při vytahování trubek docházelo ke snížení úrovně obsypu, proto jsem při vyjímání postupně dosypával předem navážený materiál až do dané úrovně.

Připravenou variantu experimentu pro měření jsem zvážil na decimální váze. Odečtením veškerých hmotností pomůcek a obsypového materiálu jsem stanovil hmotnost písku. Celou soustavu jsem přenesl na pracoviště, kde jsem si změřil teplotu a vlhkost vzdušného prostředí a teplotu vody (Obr. 7.15a). Při měření teploty vody jsem ponořil hrot multimetru pod hladinu vody tak, aby nemohlo dojít k případnému vniknutí vody přes závit k měřicímu senzoru s elektrickými obvody, a tím k jeho zničení.



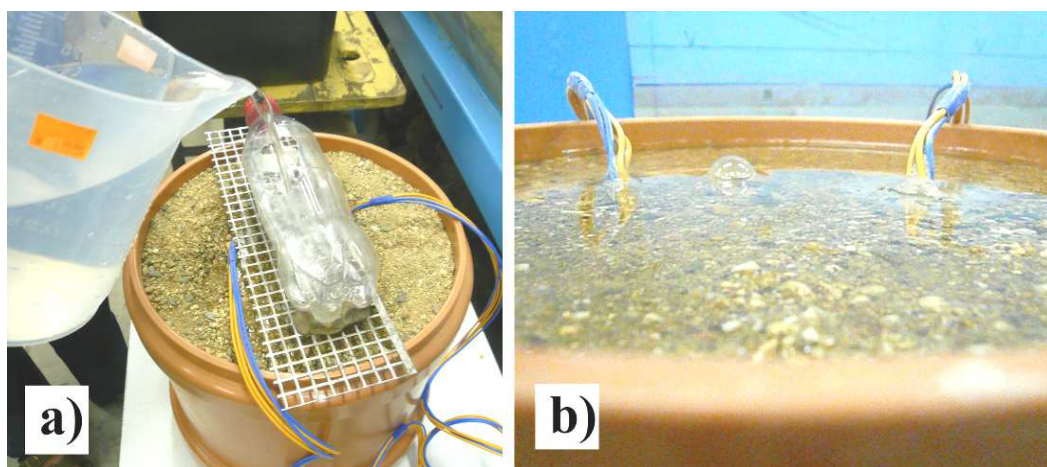
**Obr. 7.15 Měření vlhkosti a teploty**

Na válcovou nádobu jsem umístil plechovou mříž s upevněnou upravenou PET lahví. Do odměrky jsem si připravil 2 krát po 2 litrech vody, celkově tedy 4 litry vody. Toto množství vody jsem si stanovil podle zkušebního měření, ve kterém jsem se snažil najít nejvhodnější způsob provedení celého experimentu. Za nejsnáze proveditelné a definovatelné jsem vyhodnotil měření saturované zeminy.

Nyní nastává fáze měření. Připojil jsem Z-metr III k párové sondě. Nastavil jsem si parametry měření v přístroji Z-metr III. První měření jsem provedl pro suchý vzorek. U druhého měření jsem současně se spuštěním měření začal nalévat vodu z odměrky do upravené PET lahve. Vodu jsem se snažil nalévat rovnoměrně tak, aby se zasakovala a nevytvářela na povrchu hladinu. Po nalití celkového množství vody se hladina ustálila



cca 0,005 m nad povrchem měřené zeminy (Obr. 7.16b). Měření přístrojem Z-metr III trvalo přibližně 3 minuty.



**Obr. 7.16 Voda ve vzorku**

Po dokončení měření jsem odpojil přístroj Z-metr III a celou soustavu jsem znovu zvažil na decimální váze. Multimetrem Testo 454 jsem stanovil teplotu a vlhkost mokrého vzorku (Obr. 7.15b). Vlhkost vzorku byla měřena vždy v hloubce 0,15 m pod povrchem zeminy.

V posledním kroku jsem oddělil písek od obsypu. Písek jsem nechal vysušit v sušičce. Veškeré pomůcky jsem očistil a důkladně vysušil a celé pracoviště uklidil pro následující variantu měření. Zanechaná voda například na dně válcové nádoby nebo vyšší počáteční vlhkost zeminy by mohla negativně ovlivnit výsledky následující varianty měření.

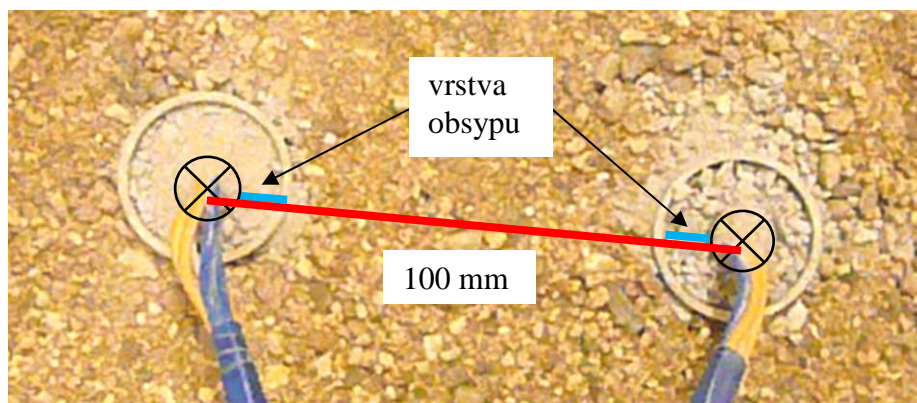
Tento postup byl využit pro krátkodobá měření. Dlouhodobá měření mají stejný postup, liší se jen v počtu měření daného materiálu. Jedná se o více než 10 měření v období 6 dnů pro jeden materiál s tenkou vrstvou obsypu.



**Obr. 7.17 Měření metodou EIS**

## 8 KRÁTKODOBÁ MĚŘENÍ

Krátkodobá měření jsem provedl pro 4 vzorky obsypového materiálu ve dvou vrstvách obsypu a měření pro písek Bratčice, který sloužil jako výchozí materiál pro porovnání hodnot jednotlivých měření. Na obrázku (Obr. 8.1) je znázorněna vrstva obsypu sond  $7,8 \cdot 10^{-3}$  m v konstantní vzdálenosti 0,100 m. Fotodokumentace a popis měření je uveden v příloze č. 2.



Obr. 8.1 Vrstva obsypu

Na přístroji Z-metr III jsem si nastavil parametry měření (postup v kapitole 6.2), které jsou pro všechna měření shodné. Nastavené parametry přístroje jsou uvedeny v tabulce (Tab. 8.1).

Tab. 8.1 Parametry měření

<b>Režim měření - Mode</b>	[ - ]	Párová sonda - 1 probe pair
<b>Počet kanálů - Channels</b>	[ - ]	5
<b>Počáteční frekvence - Start f.</b>	[Hz]	8000
<b>Konečná frekvence - End f.</b>	[Hz]	8000
<b>Přírůstek frekvence - Step f.</b>	[Hz]	0
<b>Zpoždění sejmutí hodnoty - Settling</b>	[ms]	100
<b>Zpoždění mezi měřeními - Delay</b>	[ms]	10
<b>Počet opakování - Count</b>	[ - ]	100

Frekvenci jsem zvolil na doporučení 8 kHz z důvodu, že tato frekvence je pro písčité materiál nejvhodnější a při této frekvenci se nejlépe rozeznávají změny impedance při měření (odvozeno z dlouhodobého využívání metody EIS).

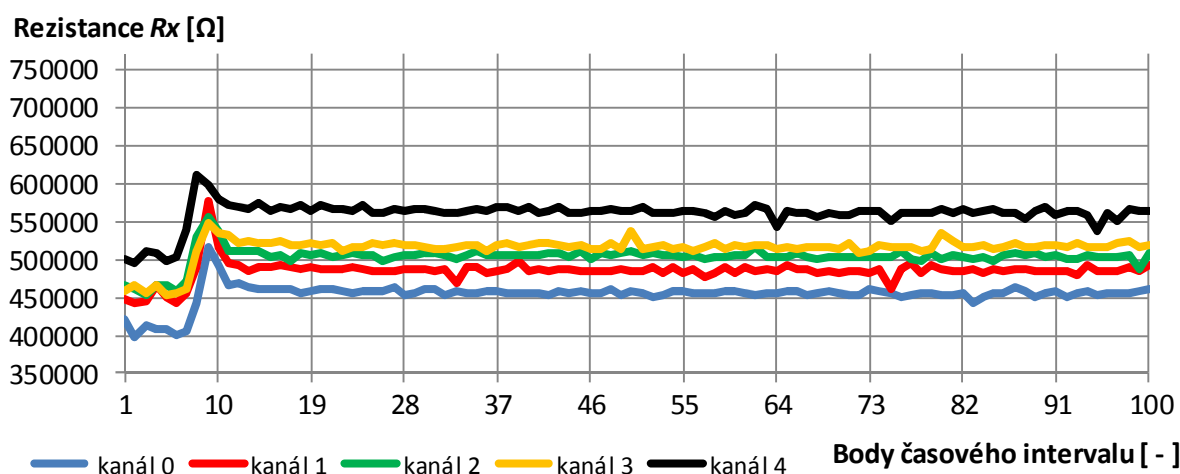
Vzdálenost mezi sondami byla vždy konstantní a postupy při všech měřeních byly shodné. Materiály byly uskladněny v prostředí s konstantními podmínkami. Pracoviště, kde byly experimenty uskutečněny, mělo jen minimálně se měnící podmínky. Na základě těchto kritérií můžu všechna měření porovnávat, protože měření vycházela ze stejných podmínek.

Změřením hodnot elektrické impedance materiálu jsem získal křivky popisující odporové vlastnosti prostředí vůči průchodu elektrického proudu. Měření bylo provedeno pěti snímači umístěnými na jedné párové sondě tj. na pěti měřicích kanálech označených 0, 1, 2, 3 a 4. Kanál „0“ byl vždy umístěn u dna válcové nádoby. Pro každý kanál jsem zhotovil křivku, která představuje průběh rezistance  $R$  (reálná složka elektrické impedance) v čase. Jelikož jsou intervaly mezi měřeními hodnot pokaždé stejné pro všechny materiály (stejně parametry měření), časovou osu (vodorovná osa) jsem popsal body časového intervalu. Důvodem je také skutečnost, že výstupní data zapsaná v textovém souboru obsahující časy měření na jednotlivých kanálech jsou uvedena v jednotkách sekund, což je při tomto měření nepřesná (zaokrouhlená) hodnota. Intervaly mají přesnost na setiny sekundy.

Pro každý materiál jsem provedl měření vzorku v suchém stavu a následně měření při skrápění vodou (mokrý stav).

## 8.1 Porovnání vzorků v suchém stavu

Na obrázku (Obr. 8.2) je znázorněn průběh měření rezistance  $R$  modifikovaného písku Bratčice v suchém stavu. S tímto materiálem jsem srovnal obsypové materiály v suchém stavu pro obě tloušťky obsypové vrstvy. Srovnáním vzorků chci poukázat na to, že přidáním dalšího materiálu (obsypový materiál) do měřeného prostředí (písek Bratčice), se ovlivní naměřené hodnoty. Přidaný materiál má totiž jiné fyzikální vlastnosti, a tím i měřené elektrické charakteristiky než výchozí zemina (jiná zrnitost, vlhkost, elektrické odporové vlastnosti atp.).



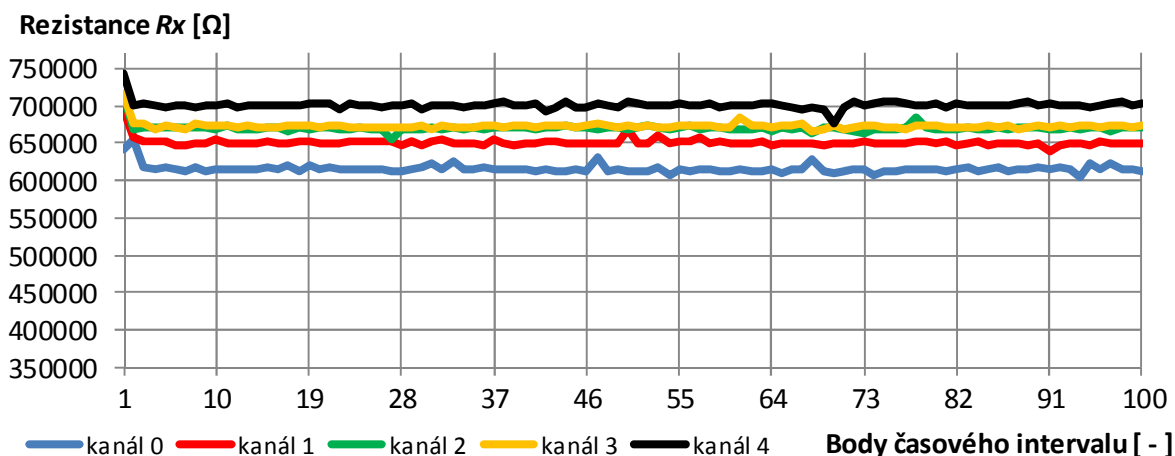
Obr. 8.2 Měření Bratčice – suchý stav

Na obrázku (Obr. 8.2) je vidět mezi pozicí 1 a 10 výchylka hodnot rezistance  $R$  na všech kanálech. Zjištěný překmit je pravděpodobně možno přisoudit ustalování podmínek měření, a to jak vzhledem k elektrickým obvodům přístroje Z-metr III, tak i vzhledem k měřené

zemíně. Další hodnoty se jeví jako konstantní. Vzhledem k dostatečně dlouhé časové řadě nemá výchylka význam.

Tab. 8.2 Vlastnosti vzorku písek Bratčice

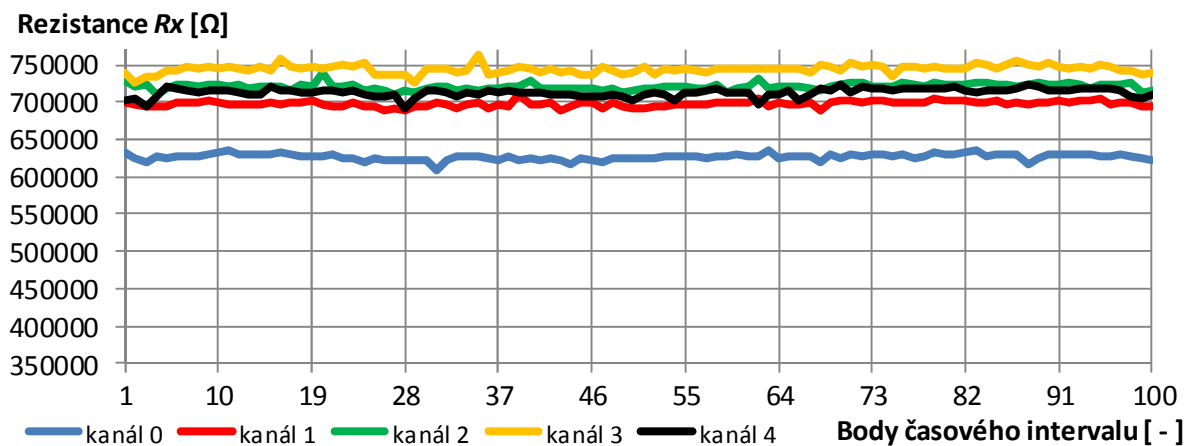
<b>Materiál</b>	Bratčice	<b>Teplota okolního prostředí [°C]</b>	20,5
<b>Hmotnost Bratčice [kg]</b>	18,888	<b>Vlhkost okolního prostředí [%]</b>	30,6
<b>Teplota Bratčice [°C]</b>	20,3	<b>Značení měření</b>	s2_br
<b>Vlhkost Bratčice [%]</b>	31,2		



Obr. 8.3 Měření Ekobeton A+B - obsyp 7,8mm – suchý stav

Tab. 8.3 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – Ekobeton A+B - obsyp 7,8 mm

<b>Obsypový materiál</b>	Ekobeton A+B	<b>Hmotnost obsypu [kg]</b>	0,3508
<b>Vrstva obsypu [mm]</b>	7,8	<b>Teplota obsypu [°C]</b>	21,5
<b>Hmotnost Bratčice [kg]</b>	18,337	<b>Vlhkost obsypu [%]</b>	31,9
<b>Teplota Bratčice [°C]</b>	20,3	<b>Teplota okolního prostředí [°C]</b>	20,5
<b>Vlhkost Bratčice [%]</b>	31,2	<b>Vlhkost okolního prostředí [%]</b>	30,6
<b>Frakce obsypu [mm]</b>	< 2	<b>Značení měření</b>	s_eko1

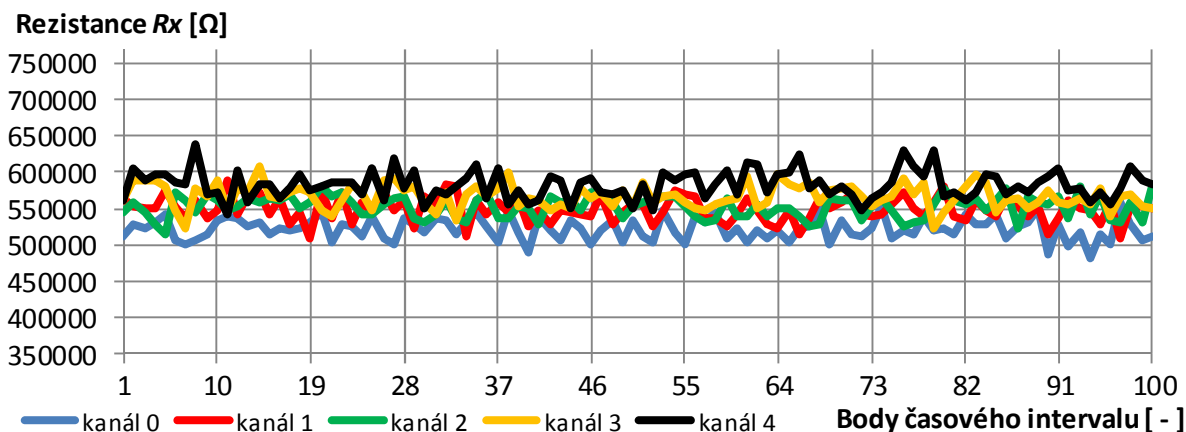


Obr. 8.4 Měření Ekobeton A+B - obsyp 16,8 mm – suchý stav



Tab. 8.4 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – Ekobeton A+B - obsyp 16,8 mm

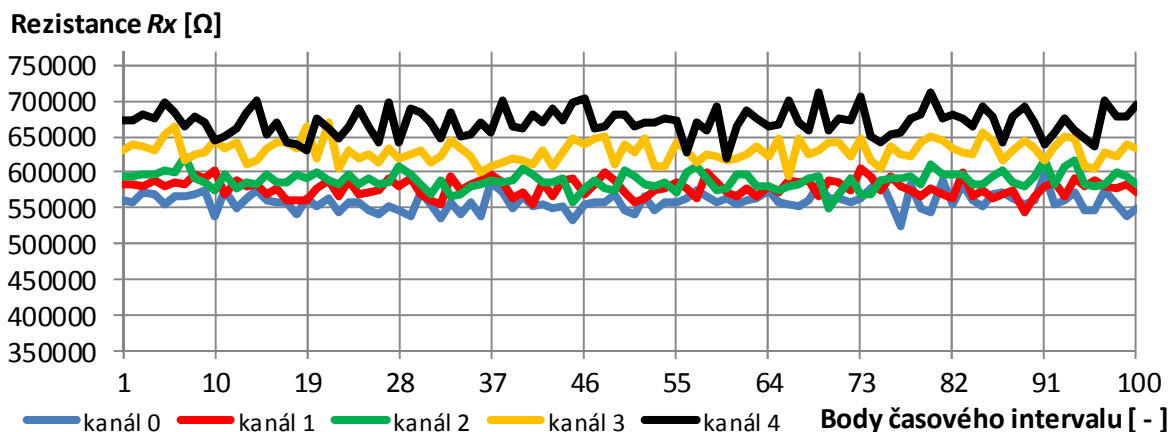
Obsypový materiál	Ekobeton A+B	Hmotnost obsypu [kg]	0,7322
Vrstva obsypu [mm]	16,8	Teplota obsypu [°C]	19,8
Hmotnost Bratčice [kg]	17,547	Vlhkost obsypu [%]	32,7
Teplota Bratčice [°C]	20,3	Teplota okolního prostředí [°C]	20,3
Vlhkost Bratčice [%]	31,2	Vlhkost okolního prostředí [%]	30,6
Frakce obsypu [mm]	< 2	Značení měření	s_ekv1



Obr. 8.5 Měření kaolin Rokle - obsyp 7,8 mm - suchý stav

Tab. 8.5 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – kaolin Rokle - obsyp 7,8 mm

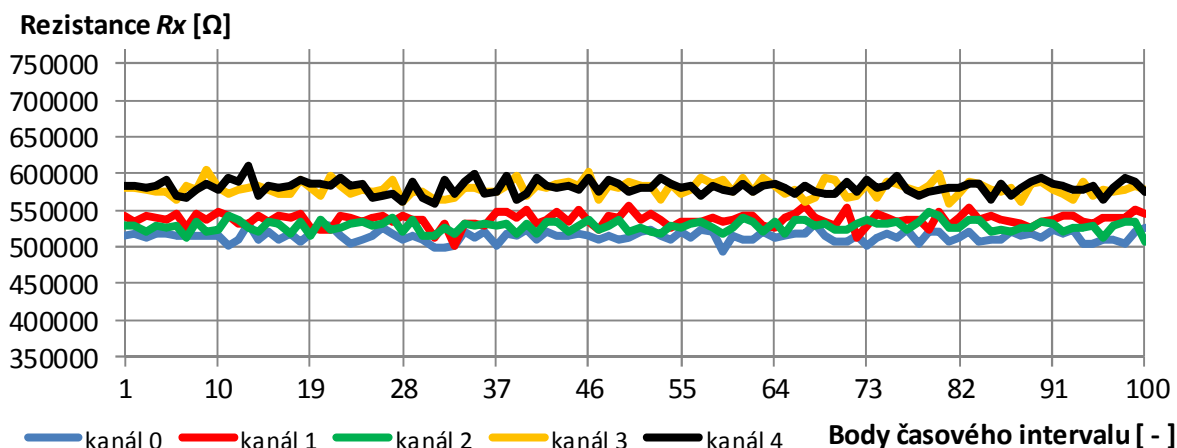
Obsypový materiál	kaolin Rokle	Hmotnost obsypu [kg]	0,3377
Vrstva obsypu [mm]	7,8	Teplota obsypu [°C]	20,2
Hmotnost Bratčice [kg]	18,937	Vlhkost obsypu [%]	35,6
Teplota Bratčice [°C]	19,8	Teplota okolního prostředí [°C]	20,2
Vlhkost Bratčice [%]	38,9	Vlhkost okolního prostředí [%]	37,5
Frakce obsypu [mm]	< 5	Značení měření	s_xv



Obr. 8.6 Měření kaolin Rokle - obsyp 16,8 mm - suchý stav

Tab. 8.6 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – kaolin Rokle - obsyp 16,8 mm

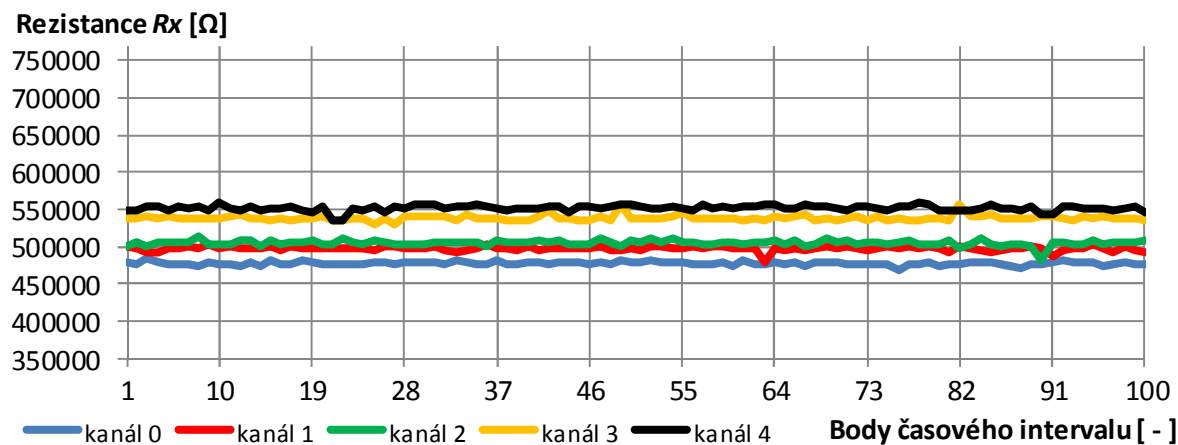
Obsypový materiál	kaolin Rokle	Hmotnost obsypu [kg]	0,9482
Vrstva obsypu [mm]	16,8	Teplota obsypu [°C]	28,8
Hmotnost Bratčice [kg]	17,567	Vlhkost obsypu [%]	38,8
Teplota Bratčice [°C]	20,8	Teplota okolního prostředí [°C]	21,1
Vlhkost Bratčice [%]	39,4	Vlhkost okolního prostředí [%]	37,0
Frakce obsypu [mm]	< 5	Značení měření	s_xvv



Obr. 8.7 Měření PN3 - obsyp 7,8 mm - suchý stav

Tab. 8.7 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – PN3 - obsyp 7,8 mm

Obsypový materiál	PN3	Hmotnost obsypu [kg]	0,3545
Vrstva obsypu [mm]	7,8	Teplota obsypu [°C]	21,0
Hmotnost Bratčice [kg]	18,337	Vlhkost obsypu [%]	33,8
Teplota Bratčice [°C]	20,9	Teplota okolního prostředí [°C]	21,1
Vlhkost Bratčice [%]	28,0	Vlhkost okolního prostředí [%]	42,4
Frakce obsypu [mm]	< 5	Značení měření	s_pn

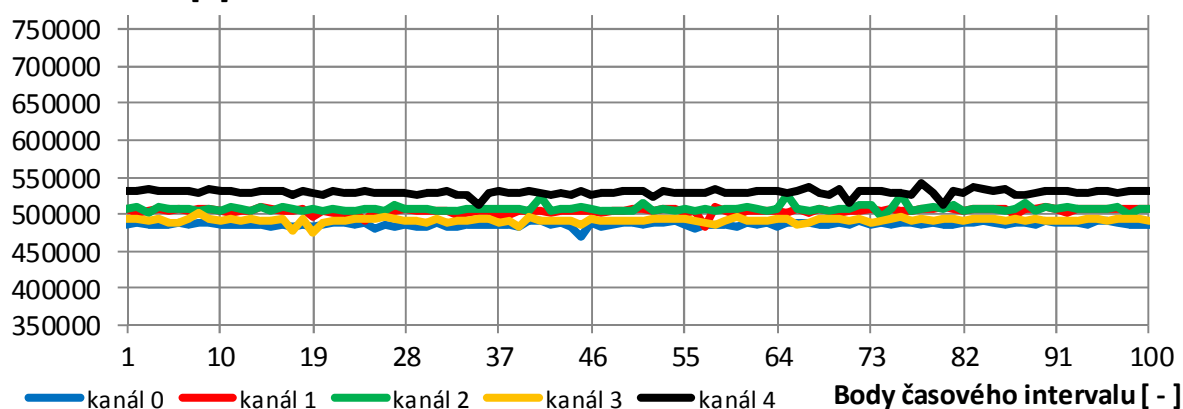


Obr. 8.8 Měření PN3 - obsyp 16,8 mm - suchý stav

Tab. 8.8 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – PN3 - obsyp 16,8 mm

Obsypový materiál	PN3	Hmotnost obsypu [kg]	0,9675
Vrstva obsypu [mm]	16,8	Teplota obsypu [°C]	21,0
Hmotnost Bratčice [kg]	17,570	Vlhkost obsypu [%]	33,8
Teplota Bratčice [°C]	20,9	Teplota okolního prostředí [°C]	21,1
Vlhkost Bratčice [%]	28,0	Vlhkost okolního prostředí [%]	42,4
Frakce obsypu [mm]	< 5	Značení měření	s_pnv

Rezistance  $R_x$  [ $\Omega$ ]

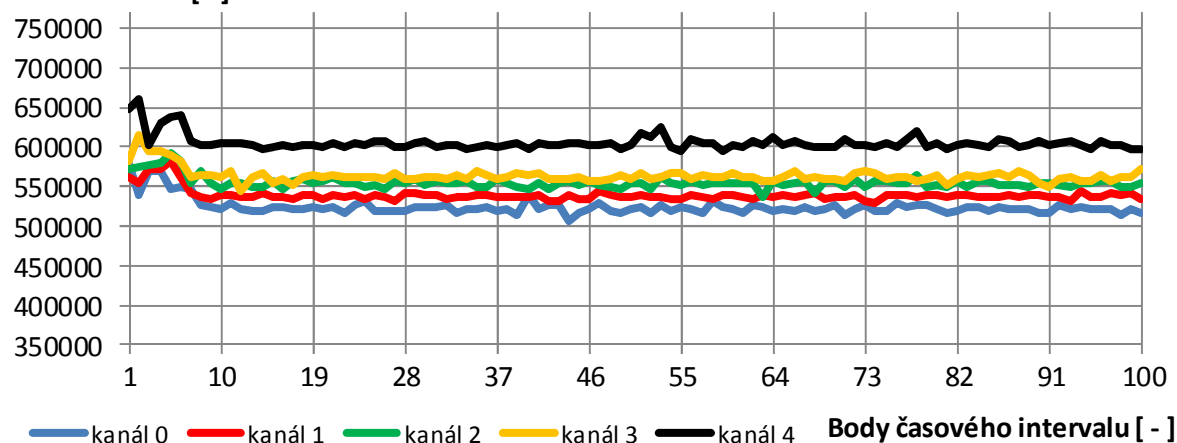


Obr. 8.9 Měření W-extra-J-SV - obsyp 7,8 mm – suchý stav

Tab. 8.9 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – W-extra-J-SV - obsyp 7,8 mm

Obsypový materiál	W-extra-J-SV	Hmotnost obsypu [kg]	0,3378
Vrstva obsypu [mm]	7,8	Teplota obsypu [°C]	21,6
Hmotnost Bratčice [kg]	18,340	Vlhkost obsypu [%]	34,9
Teplota Bratčice [°C]	20,7	Teplota okolního prostředí [°C]	21,1
Vlhkost Bratčice [%]	32,7	Vlhkost okolního prostředí [%]	28,4
Frakce obsypu [mm]	< 5	Značení měření	s_we

Rezistance  $R_x$  [ $\Omega$ ]



Obr. 8.10 Měření W-extra-J-SV - obsyp 16,8 mm – suchý stav

Tab. 8.10 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – W-extra-J-SV - obsyp 16,8 mm

Obsypový materiál	W-extra-J-SV	Hmotnost obsypu [kg]	0,935
Vrstva obsypu [mm]	16,8	Teplota obsypu [°C]	21,6
Hmotnost Bratčice [kg]	17,560	Vlhkost obsypu [%]	34,9
Teplota Bratčice [°C]	20,7	Teplota okolního prostředí [°C]	21,1
Vlhkost Bratčice [%]	32,7	Vlhkost okolního prostředí [%]	28,4
Frakce obsypu [mm]	< 5	Značení měření	s_wev

Podle obrázků jednotlivých měření v suchém stavu je vidět, že přidáním vrstvy obsypového materiálu do měřeného vzorku písku Bratčice se hodnoty všech křivek změnily. Posun křivek nastává i při použití různých vrstev obsypu. Čím větší bude mocnost vrstvy obsypu, tím budou zpravidla o větší hodnoty posunuty křivky. Přehled průměrných hodnot rezistance  $R$  všech materiálů vysušených při 105°C je uveden v tabulce (Tab. 8.11).

Tab. 8.11 Průměrné hodnoty rezistance  $R$  zkoumaných materiálů

Materiál	Bratčice	Ekobeton A+B		kaolin Rokle		PN3		W-extra-J-SV	
Vrstva	-	7,8	16,8	7,8	16,8	7,8	16,8	7,8	16,8
Kanál	Průměrné hodnoty $R_x$ [ $\Omega$ ]								
0	453 642	615 703	626 484	521 719	559 002	514 611	478 047	486 180	524 545
1	484 585	650 989	697 713	548 936	578 132	537 478	497 679	504 366	539 250
2	502 926	670 300	720 500	552 255	588 135	528 295	505 207	507 279	555 037
3	514 060	672 900	744 166	566 720	629 583	579 597	538 954	491 517	563 590
4	560 231	701 016	712 745	582 675	669 735	581 503	551 955	529 370	605 475

Dle tabulky (Tab. 8.11) se se zvětšením mocnosti vrstvy materiálů Ekobeton A+B, kaolin Rokle a jíl W-extra-J-SV zvětšila hodnota rezistance  $R$ . Mocnost vrstvy tedy přímo úměrně závisí na velikosti rezistance  $R$ .

U jílu PN3 se hodnota rezistance  $R$  u vrstvy 7,8 mm zvýšila, ale při zvětšení mocnosti vrstvy na 16,8 mm naopak klesla a přiblížila se hodnotám Bratčice. Pro měření za použití materiálu PN3 je tedy velmi rozhodující mocnost vrstvy obsypu. Na rozdíl od tří předešlých materiálů může větší vrstva PN3 změnit hodnoty měření na menší než pro měřené prostředí (Bratčice).

Pro měření suchého prostředí se jeví jako nejvhodnější z daných materiálů Ekobeton A+B a kaolin Rokle. Z hodnot v tabulce (Tab. 8.11) lze určit průměrnou změnu hodnoty rezistance  $R$  při využití obsypového materiálu oproti vzorku písek Bratčice (Tab. 8.12). Červeně označené hodnoty představují velkou odchylku oproti ostatním hodnotám. Z tabulky

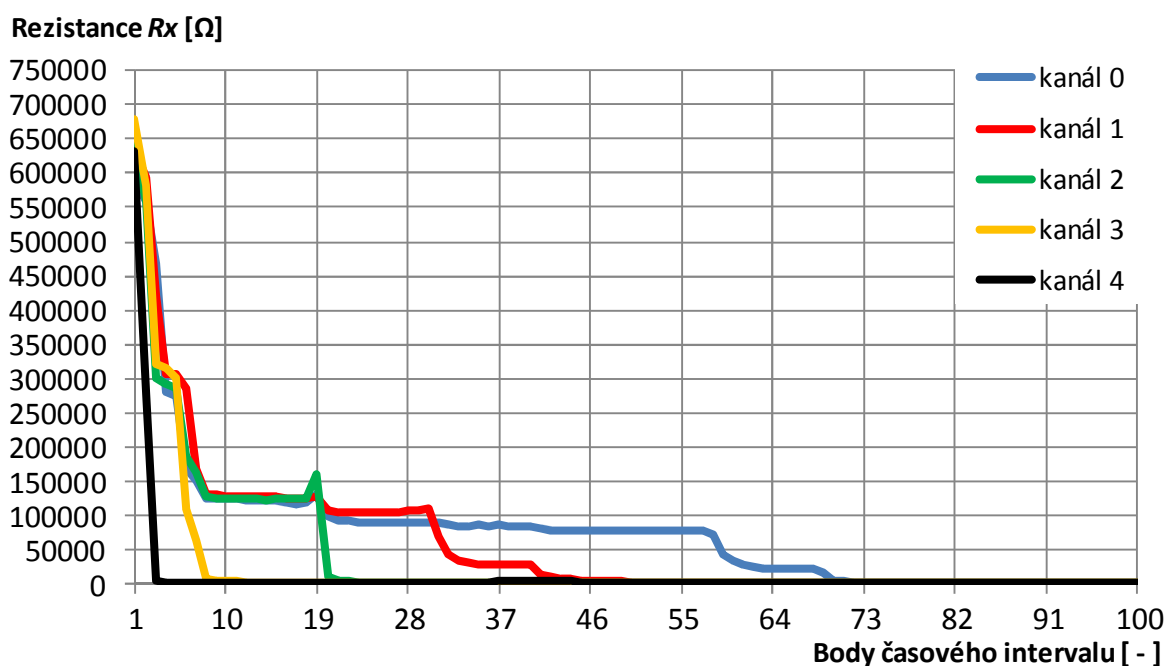
(Tab. 8.12) lze usoudit, že tyto dva materiály se dají využít pro měření prostředí v suchém stavu.

Tab. 8.12 Rozdíl hodnot  $R_x$  materiálů od Bratčice

Materiál	Ekobeton A+B		kaolin Rokle	
Vrstva	7,8 mm	16,8 mm	7,8 mm	16,8 mm
Kanál	Rozdíl hodnot $R_x$ materiálů a vzorku písek Bratčice [ $\Omega$ ]			
0	162 061	172 842	68 077	105 360
1	166 404	213 129	64 352	93 548
2	167 374	217 574	49 329	85 209
3	158 840	230 106	52 659	115 523
4	140 785	152 514	22 443	109 504
Průměr	159 093	197 233	51 372	101 829

## 8.2 Porovnání vzorků v mokrém stavu

Měřením vzorků v mokrém stavu (při skrápění vodou) se snažím nalézt podobný průběh rezistance  $R$  v čase jako u vzorku písek Bratčice.



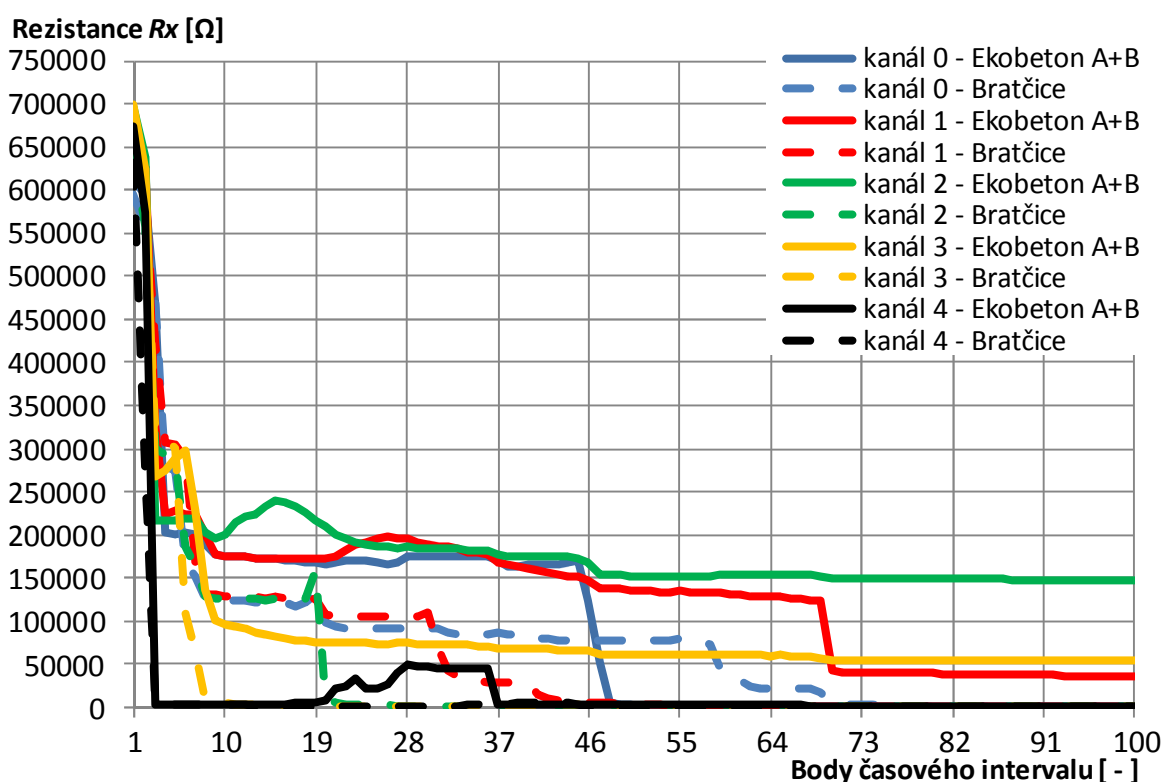
Obr. 8.11 Měření Bratčice – mokrý stav

Na obrázku (Obr. 8.11) je znázorněn prostup vody zeminou v jednotlivých výškových úrovních. Zvyšující se obsah vody v profilu snímače snižuje v čase hodnotu rezistance  $R$  (body časového intervalu). Nejdříve byla nasycena horní vrstva zeminy v úrovni snímače (kanál 4) a postupně další vrstvy (kanály 3, 2, 1 a 0). Po vytvoření hladiny vody na povrchu materiálu byl vzorek považován za plně nasycený vodou, což představuje hodnotu rezistance

$R$  v řádu desítek ohmů. Na základě výsledků měření vzorků v suchém stavu lze předpokládat, že přidáním obsypu se změní hodnoty rezistance  $R$ . Při skrápění materiálů vodou bude záležet na chování materiálů při styku s vodou.

Tab. 8.13 Vlastnosti Bratčice

<b>Materiál</b>	Bratčice	<b>Objem vody [ l ]</b>	4
<b>Hmotnost Bratčice [kg]</b>	18,888	<b>Teplota okolního prostředí [°C]</b>	20,5
<b>Teplota Bratčice [°C]</b>	20,3	<b>Vlhkost okolního prostředí [%]</b>	30,6
<b>Vlhkost Bratčice [%]</b>	31,2	<b>Hmotnost Bratčice s vodou [kg]</b>	22,888
<b>Teplota vody [°C]</b>	19,8	<b>Značení měření</b>	m_br0



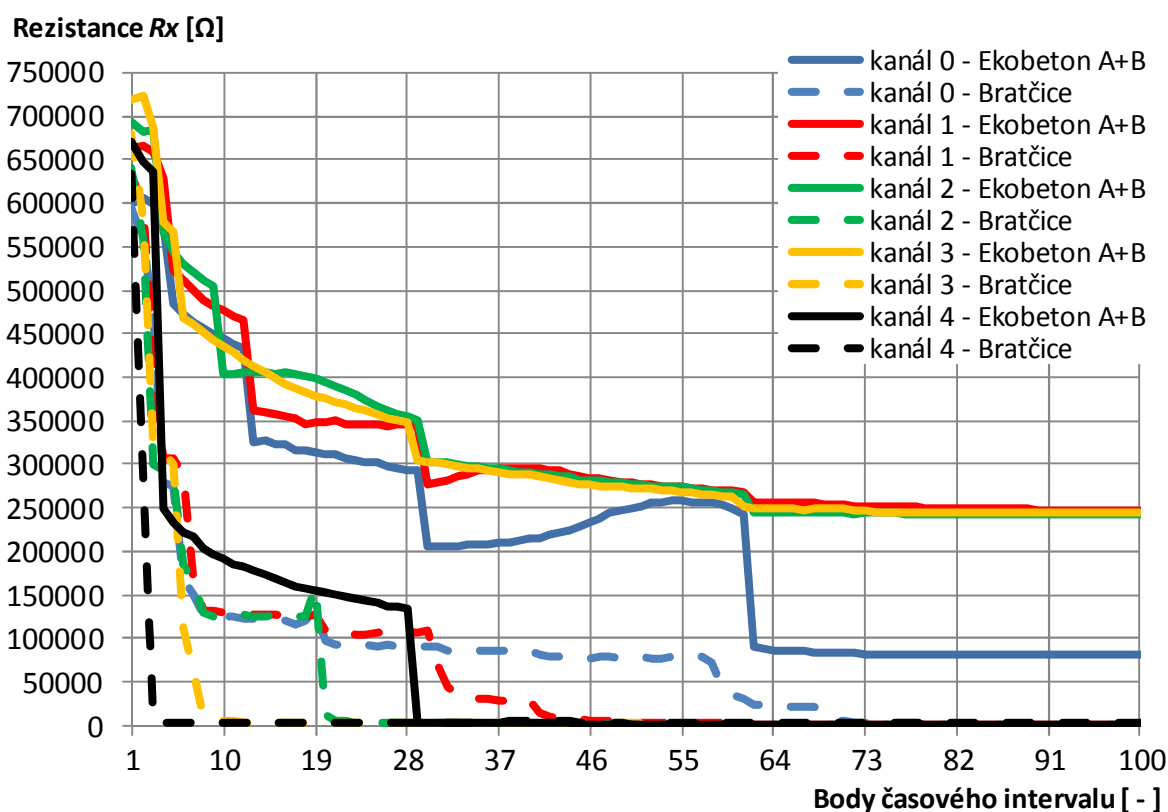
Obr. 8.12 Měření Ekobeton A+B – obsyp 7,8 mm – mokrý stav

Na obrázku (Obr. 8.12) je vidět, že průběh měření s obsypem z Ekobetonu v tloušťce 7,8 mm je zcela odlišný od průběhu sycení vzorku písek Bratčice. Neshodují se pořadí kanálů v časových bodech, což znamená, že se voda v jednotlivých úrovních dostává k měřicím elektrodám snímače skrz obsypový materiál nahodile resp. v jednotlivých vrstvách se vytvářejí preferenční cesty, které více odpovídají specifickým vlastnostem obsypového materiálu (Ekobeton A+B) než měřeného vzorku (písek Bratčice). Vrstvy nebyly zcela nasyceny vodou (kanály 1, 2 a 3). Především kanál 2 se vyznačuje vysokou rezistancí  $R$ .



Tab. 8.14 Vlastnosti vzorku – Ekobeton A+B - obsyp 7,8 mm

Obsypový materiál	Ekobeton A+B	Vlhkost obsypu [%]	31,9
Vrstva obsypu [mm]	7,8	Teplota okolního prostředí [°C]	20,5
Hmotnost Bratčice [kg]	18,337	Vlhkost okolního prostředí [%]	30,6
Teplota Bratčice [°C]	20,3	Teplota vody [°C]	19,8
Vlhkost Bratčice [%]	31,2	Objem vody [l]	4
Frakce obsypu [mm]	< 2	Hmotnost vzorku s vodou [kg]	22,688
Hmotnost obsypu [kg]	0,3508	Značení měření	m_eko1
Teplota obsypu [°C]	21,5		

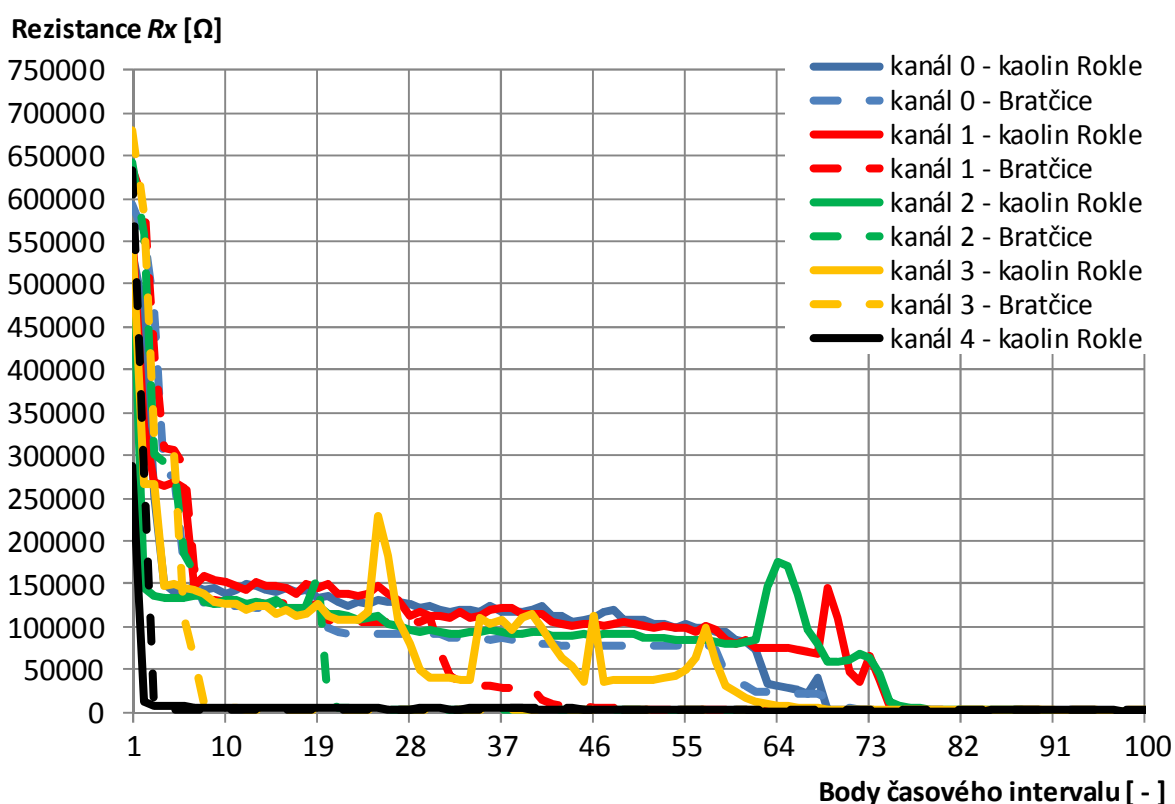


Obr. 8.13 Měření Ekobeton A+B – obsyp 16,8 mm –mokrý stav

Zvětšení mocnosti vrstvy obsypového materiálu Ekobetonu A+B se hodnoty rezistance  $R$  ještě více zvýšily, což potvrdilo nedostatečnou propustnost vzorku (Obr. 8.13). Navíc tento materiál prokazoval vysokou bobtnavost (PŘÍLOHA 3), která je nežádoucí pro využití jako obsypu. Při čištění pomůcek jsem zjistil, že se obsypový materiál v některých vrstvách vůbec nedostal do kontaktu s vodou (vzorek byl v suchém stavu). Mohu tedy s jistotou označit tento materiál jako nevyhovující.

Tab. 8.15 Vlastnosti vzorku – Ekobeton A+B - obsyp 16,8 mm

Obsypový materiál	Ekobeton A+B	Vlhkost obsypu [%]	32,7
Vrstva obsypu [mm]	16,8	Teplota okolního prostředí [°C]	20,3
Hmotnost Bratčice [kg]	17,547	Vlhkost okolního prostředí [%]	30,6
Teplota Bratčice [°C]	20,3	Teplota vody [°C]	18,6
Vlhkost Bratčice [%]	31,2	Objem vody [l]	4
Frakce obsypu [mm]	< 2	Hmotnost vzorku s vodou [kg]	22,279
Hmotnost obsypu [kg]	0,7322	Značení měření	m_ekv1
Teplota obsypu [°C]	19,8		



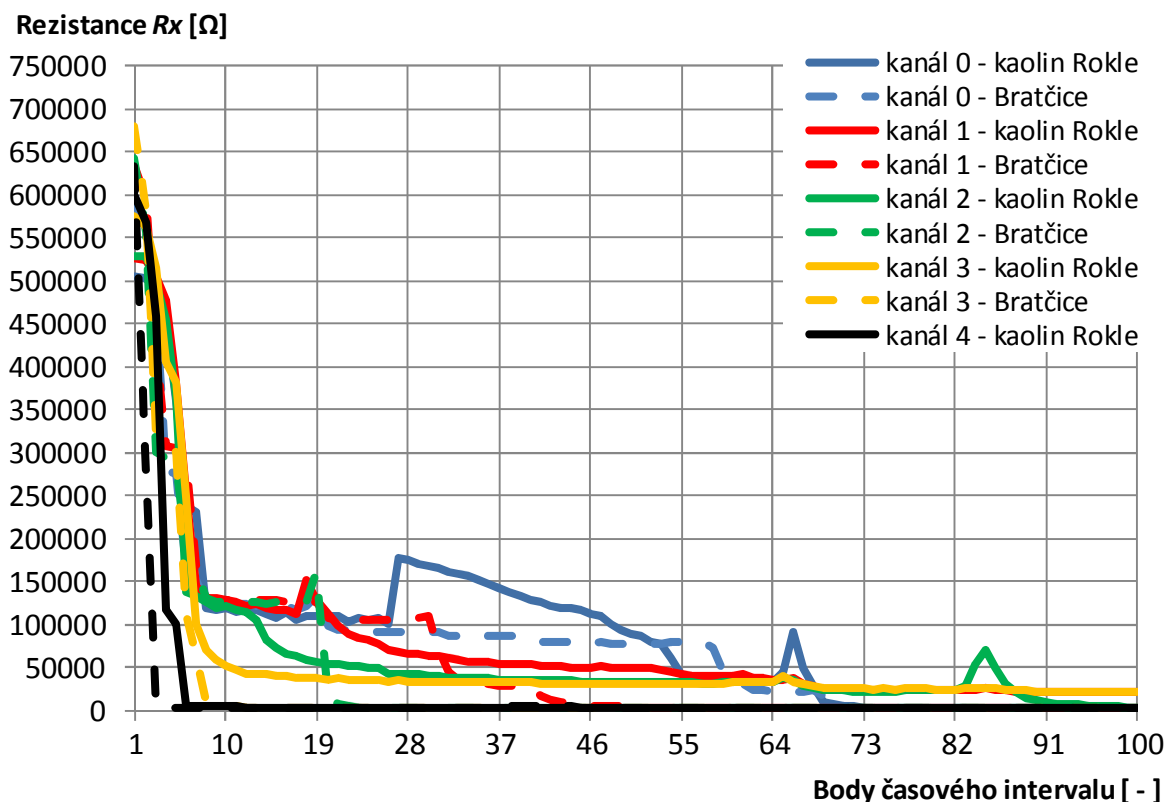
Obr. 8.14 Měření kaolin Rokle – obsyp 7,8 mm – mokrý stav

U obsypového materiálu s kaolinem v tloušťce 7,8 mm se vzorek nasýtil vodou jako tomu bylo u referenčního vzorku písek Bratčice, avšak průběh sycení obsypového materiálu vodou neodpovídá vzorku písek Bratčice. Kanály 0, 1 a 2 mají jiné pořadí, vrstva na kanálu 0 byla mnohem dříve nasycena než u kanálů 1 a 2. Vzniklou odchylku si opět vysvětlují tvorbou preferenčních cest proudění v průběhu sycení materiálů. Přestože uvedený obsypový materiál reaguje na změnu obsahu vody v jednotlivých měřených úrovních výrazně lépe než v předchozím případě, musím na základě hodnot zjištěných měření konstatovat,

že ani zde nebyl zaznamenán stejný průběh jako u referenčního vzorku. Křivky tohoto vzorku tedy nevykazují stejný posun oproti křivkám Bratčice.

Tab. 8.16 Vlastnosti vzorku – kaolin Rokle – obsyp 7,8 mm

Obsypový materiál	kaolin Rokle	Vlhkost obsypu [%]	35,6
Vrstva obsypu [mm]	7,8	Teplota okolního prostředí [°C]	20,2
Hmotnost Bratčice [kg]	18,937	Vlhkost okolního prostředí [%]	37,5
Teplota Bratčice [°C]	19,8	Teplota vody [°C]	20,0
Vlhkost Bratčice [%]	38,9	Objem vody [ l ]	4
Frakce obsypu [mm]	< 5	Hmotnost vzorku s vodou [kg]	23,275
Hmotnost obsypu [kg]	0,3377	Značení měření	m_xv
Teplota obsypu [°C]	20,2		



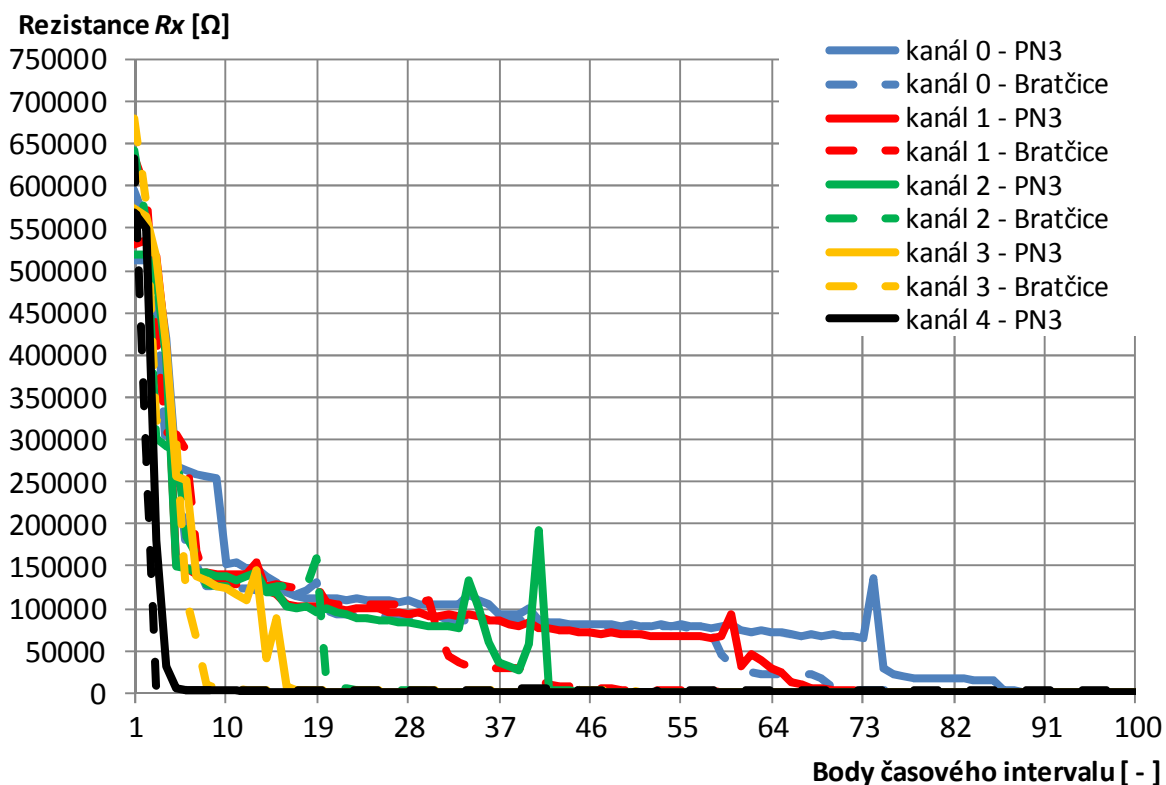
Obr. 8.15 Měření kaolin Rokle – obsyp 16,8 mm – mokrý stav

Při větší mocnosti vrstvy obsypového materiálu s kaolinem naznačují posuny křivek podobný průběh jako u vzorku písek Bratčice. Ve fázi přechodu do úplného nasycení vodou dochází k nasycení vrstev v jiném pořadí, podobně jako u tenké vrstvy tohoto obsypového materiálu. Pokud by tedy měl být sledován postup kontaminantu písčité zeminy použitou aparaturou, kde by měřicí sonda byla obsypána materiálem kaolin Rokle, výhoda možnosti

sledovat stav v jednotlivých hloubkách definovaných vzdáleností snímačů na sondě by byla zrušena. Proto kaolin Rokle jako obsypový materiál nedoporučuji.

Tab. 8.17 Vlastnosti vzorku – kaolin Rokle – obsyp 16,8 mm

<b>Obsypový materiál</b>	kaolin Rokle	<b>Vlhkost obsypu [%]</b>	38,8
<b>Vrstva obsypu [mm]</b>	16,8	<b>Teplota okolního prostředí [°C]</b>	21,1
<b>Hmotnost Bratčice [kg]</b>	17,567	<b>Vlhkost okolního prostředí [%]</b>	37
<b>Teplota Bratčice [°C]</b>	20,8	<b>Teplota vody [°C]</b>	19,4
<b>Vlhkost Bratčice [%]</b>	39,4	<b>Objem vody [ l ]</b>	4
<b>Frakce obsypu [mm]</b>	< 5	<b>Hmotnost vzorku s vodou [kg]</b>	22,515
<b>Hmotnost obsypu [kg]</b>	0,9482	<b>Značení měření</b>	m_xvv
<b>Teplota obsypu [°C]</b>	28,8		



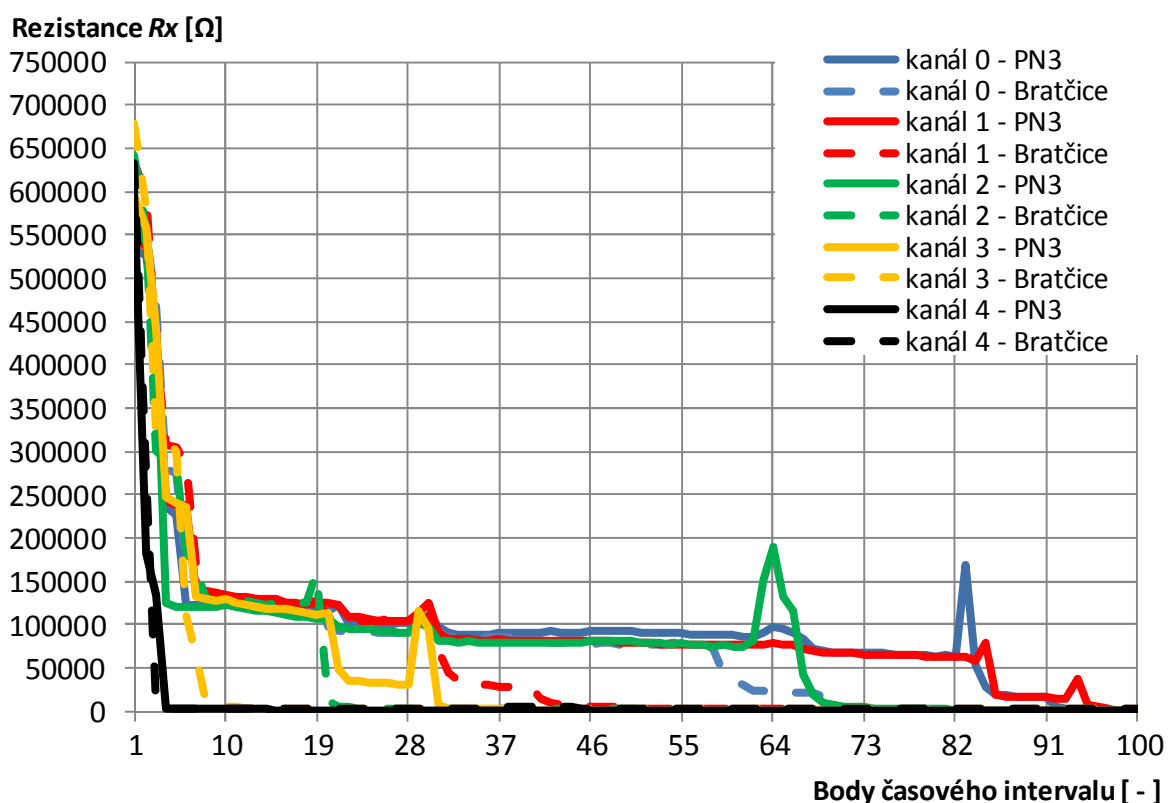
Obr. 8.16 Měření PN3 - obsyp 7,8 mm -mokrý stav

Při použití obsypového materiálu s označením PN3 zjištěné křivky vykazují podobný průběh jako pro vzorek písek Bratčice. K nasycení vrstev zeminy zaznamenané na jednotlivých kanálech dochází ve stejném pořadí jako u referenčního vzorku. Mezi křivkami označenými Bratčice a PN3 je vidět časový posun. Bude-li tedy v písčité zemině použit jako obsypový materiál sondy měřicí metody EIS jíl PN3, je třeba počítat

při detekci změn probíhajících v zemině s časovým zpožděním, avšak výhoda možnosti sledovat změny v jednotlivých úrovních zůstane zachována. Tento jíl bych shledal vhodným pro použití jako obsypového materiálu.

Tab. 8.18 Vlastnosti vzorku – PN3 – obsyp 7,8 mm

<b>Obsypový materiál</b>	PN3	<b>Vlhkost obsypu [%]</b>	33,8
<b>Vrstva obsypu [mm]</b>	7,8	<b>Teplota okolního prostředí [°C]</b>	21,1
<b>Hmotnost Bratčice [kg]</b>	18,337	<b>Vlhkost okolního prostředí [%]</b>	42,4
<b>Teplota Bratčice [°C]</b>	20,9	<b>Teplota vody [°C]</b>	20,6
<b>Vlhkost Bratčice [%]</b>	28	<b>Objem vody [ l ]</b>	4
<b>Frakce obsypu [mm]</b>	< 5	<b>Hmotnost vzorku s vodou [kg]</b>	22,692
<b>Hmotnost obsypu [kg]</b>	0,3545	<b>Značení měření</b>	m_pn
<b>Teplota obsypu [°C]</b>	21		



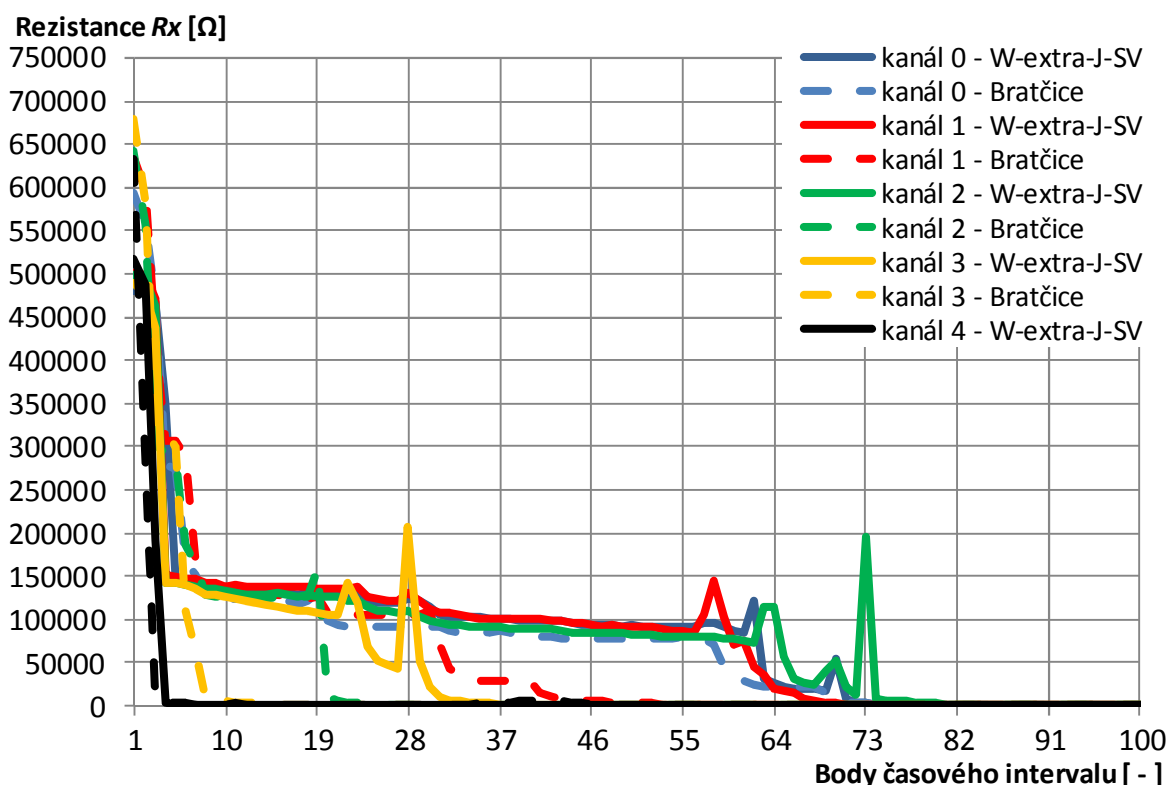
Obr. 8.17 Měření PN3 – obsyp 16,8 mm – mokrý stav

U vzorku s větší vrstvou obsypového materiálu PN3 je detekce sycení jednotlivých profilů vůči referenčnímu vzorku analogická jako v předchozím případě. Průběhy zjištěné na kanálech 0 a 1 jsou téměř identické. U kanálu 0 bych očekával větší časový posun, avšak zřejmě i v důsledku zatížení zeminou s narůstajícím obsahem vody nad měřeným profilem

dochází rychleji k tvorbě preferenčních cest proudění. Jelikož se jedná o na sebe navazující vrstvy, mohl být posun křivky na kanále 0 zkreslen vlivem uspořádání částic materiálu. Odchylna od předpokládaného průběhu není výrazná. I z hlediska měřených elektrických vlastností obsypový materiál PN3 koresponduje s referenčním vzorkem zeminy. Tento materiál tedy mohou označit za vhodný pro obsyp sondy.

Tab. 8.19 Vlastnosti vzorku – PN3 – obsyp 16,8 mm

<b>Obsypový materiál</b>	PN3	<b>Vlhkost obsypu [%]</b>	33,8
<b>Vrstva obsypu [mm]</b>	16,8	<b>Teplota okolního prostředí [°C]</b>	21,1
<b>Hmotnost Bratčice [kg]</b>	17,570	<b>Vlhkost okolního prostředí [%]</b>	42,4
<b>Teplota Bratčice [°C]</b>	20,9	<b>Teplota vody [°C]</b>	20,6
<b>Vlhkost Bratčice [%]</b>	28	<b>Objem vody [ l ]</b>	4
<b>Frakce obsypu [mm]</b>	< 5	<b>Hmotnost vzorku s vodou [kg]</b>	22,538
<b>Hmotnost obsypu [kg]</b>	0,9675	<b>Značení měření</b>	m_pnv
<b>Teplota obsypu [°C]</b>	21		



Obr. 8.18 Měření W-extra-J-SV – obsyp 7,8 mm – mokrý stav

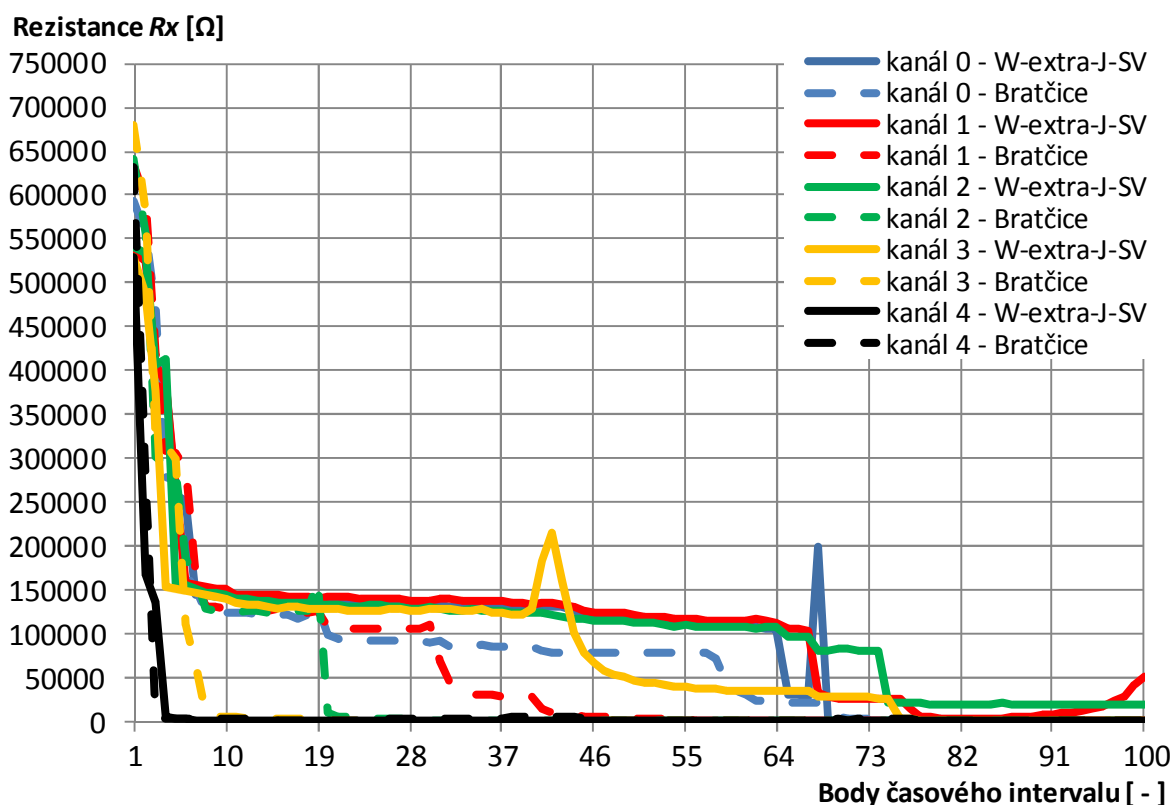
Podle obrázku (Obr. 8.18) jsou vrstvy na kanálech 0, 1 a 2 nasyceny vodou téměř ve stejném čase. Z obrázku tedy není poznat postupný průběh křivek na jednotlivých kanálech



jako u referenčního vzorku písek Bratčice. Je pravděpodobné, že voda proudí nejprve obsypovým materiálem a až následně se dostává do měřené zeminy. Proto bych tento vzorek ve vrstvě 7,8 mm nenavrhoval využít jako obsypový materiál.

Tab. 8.20 Vlastnosti vzorku – W-extra-J-SV – obsyp 7,8 mm

Obsypový materiál	W-extra-J-SV	Vlhkost obsypu [%]	34,9
Vrstva obsypu [mm]	7,8	Teplota okolního prostředí [°C]	21,1
Hmotnost Bratčice [kg]	18,340	Vlhkost okolního prostředí [%]	28,4
Teplota Bratčice [°C]	20,7	Teplota vody [°C]	19,5
Vlhkost Bratčice [%]	32,7	Objem vody [ l ]	4
Frakce obsypu [kg]	< 5	Hmotnost vzorku s vodou [kg]	22,678
Hmotnost obsypu [mm]	0,3378	Značení měření	m_we
Teplota obsypu [°C]	21,6		



Obr. 8.19 Měření W-extra-J-SV - obsyp 16,8 mm -mokrý stav

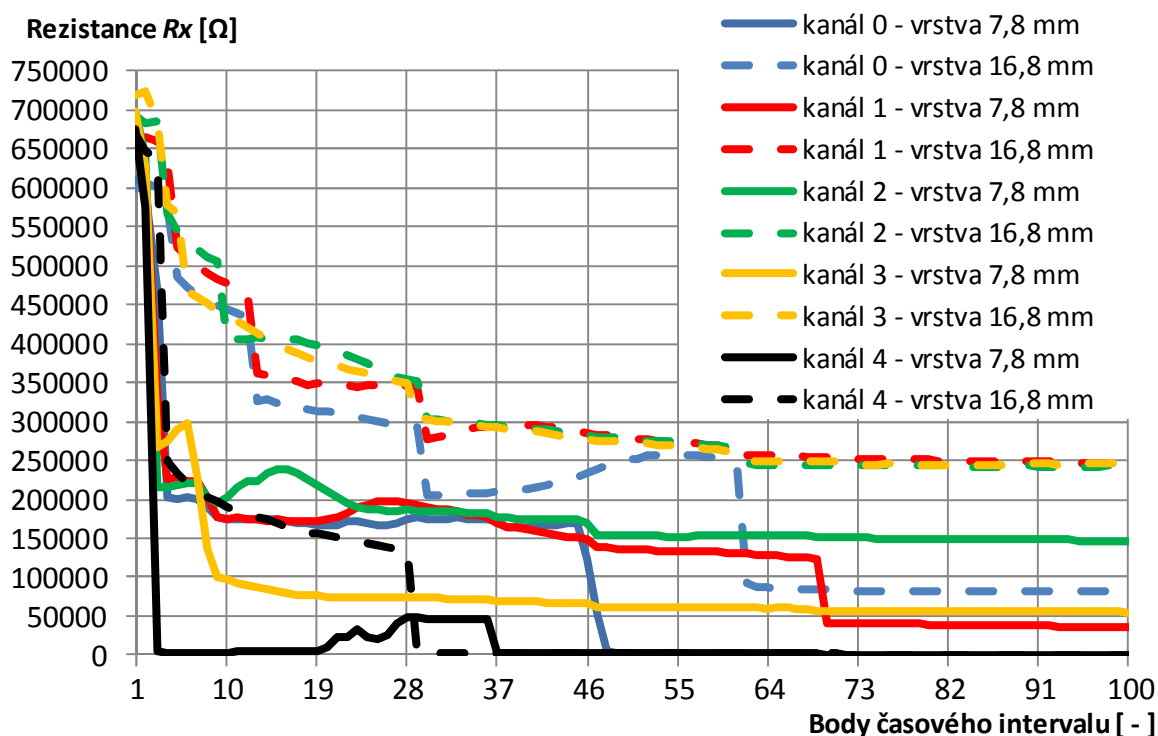
Průběh křivek vzorku obsypového materiálu na obrázku (Obr. 8.19) se liší oproti vzorku písek Bratčice na kanálech 0, 1 a 2. Vrstva zeminy s obsypovým materiálem v úrovni kanálu 2 pravděpodobně není zcela úplně nasycena, protože hodnota rezistance  $R$  zůstává vyšší než v jiných úrovních. Tato skutečnost však může být způsobena i rozdílnou

granulometrií obsypového materiálu v diskutované úrovni. Pro bližší specifikaci jednotlivých vlivů by bylo třeba variantu experimentu opakovat. Na základě provedeného měření a shodného postupu při vyhodnocování experimentu bych proto těžený jíl W-extra-J-SV neshledal vhodným pro použití obsypu sond.

Tab. 8.21 Vlastnosti vzorku – W-extra-J-SV - obsyp 16,8 mm

Obsypový materiál	W-extra-J-SV	Vlhkost obsypu [%]	34,9
Vrstva obsypu [mm]	16,8	Teplota okolního prostředí [°C]	21,1
Hmotnost Bratčice [kg]	17,560	Vlhkost okolního prostředí [%]	28,4
Teplota Bratčice [°C]	20,7	Teplota vody [°C]	19,5
Vlhkost Bratčice [%]	32,7	Objem vody [ l ]	4
Frakce obsypu [mm]	< 5	Hmotnost vzorku s vodou [kg]	22,495
Hmotnost obsypu [kg]	0,935	Značení měření	m_wev
Teplota obsypu [°C]	21,6		

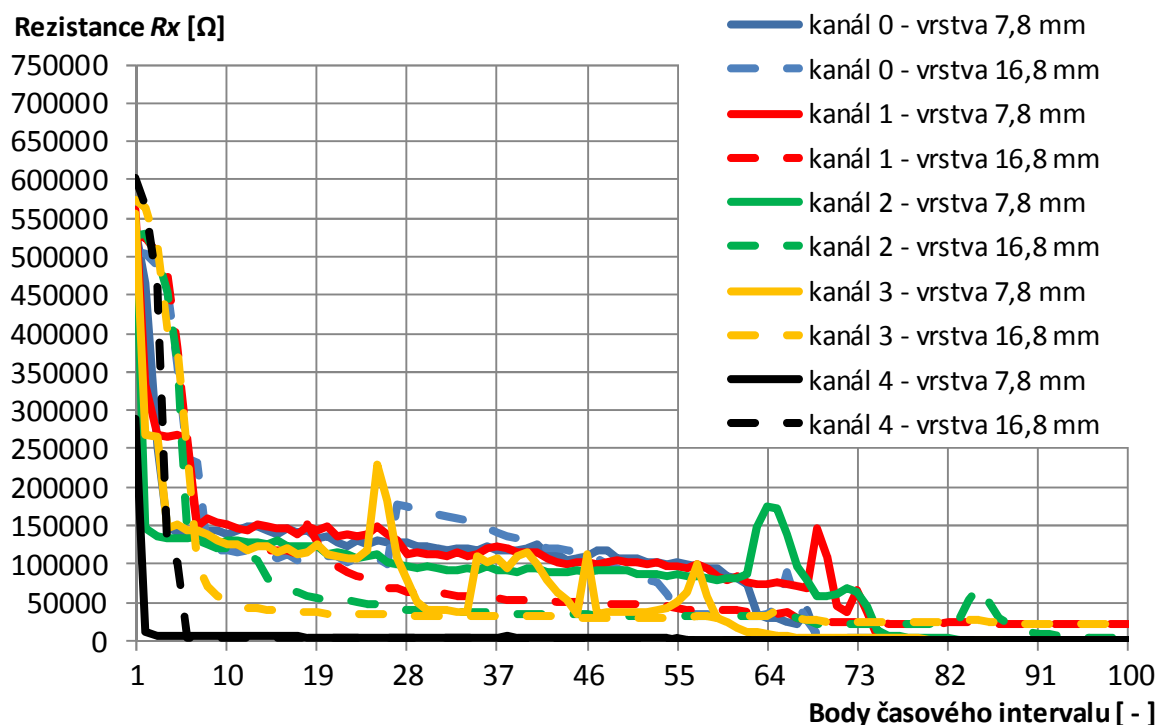
### 8.3 Porovnání vrstev obsypu zkoumaných materiálů v mokřém stavu



Obr. 8.20 Porovnání vrstev – Ekobeton A+B

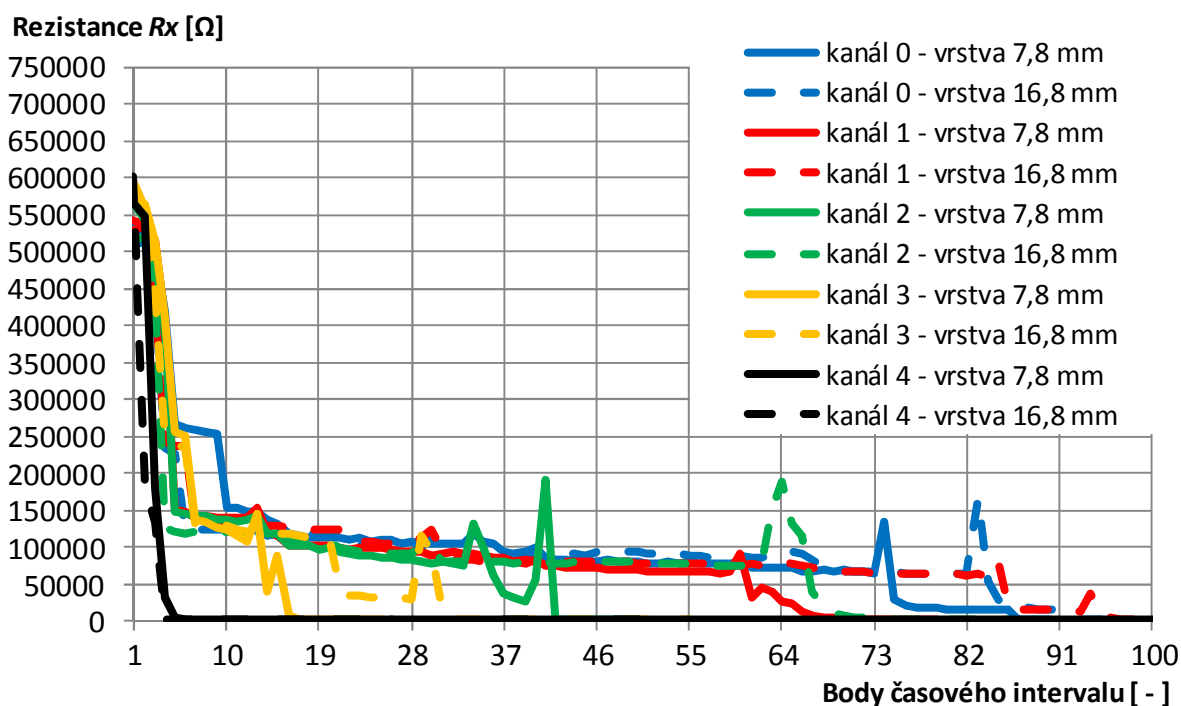
Z obrázku (Obr. 8.20) je patrné, že zvětšením mocnosti vrstvy obsypového materiálu se průběh křivek na každém kanálu pro všechny zkoušené materiály změnil. Křivky nevykazují podobnost. Důvodem pravděpodobně může být bobtnavost a granulometrické

složení obsypového materiálu, které mohou nerovnoměrně měnit vlastnosti jednotlivých vrstev.



Obr. 8.21 Porovnání vrstev – kaolin Rokle

Větší vrstva kaolinu Rokle prokazovala dle obrázku (Obr. 8.21) rychlejší průběh nasycení, Výjimkou jsou křivky kanálu 0, jejíž důvodem může být rozdíl v okamžiku spuštění měření.



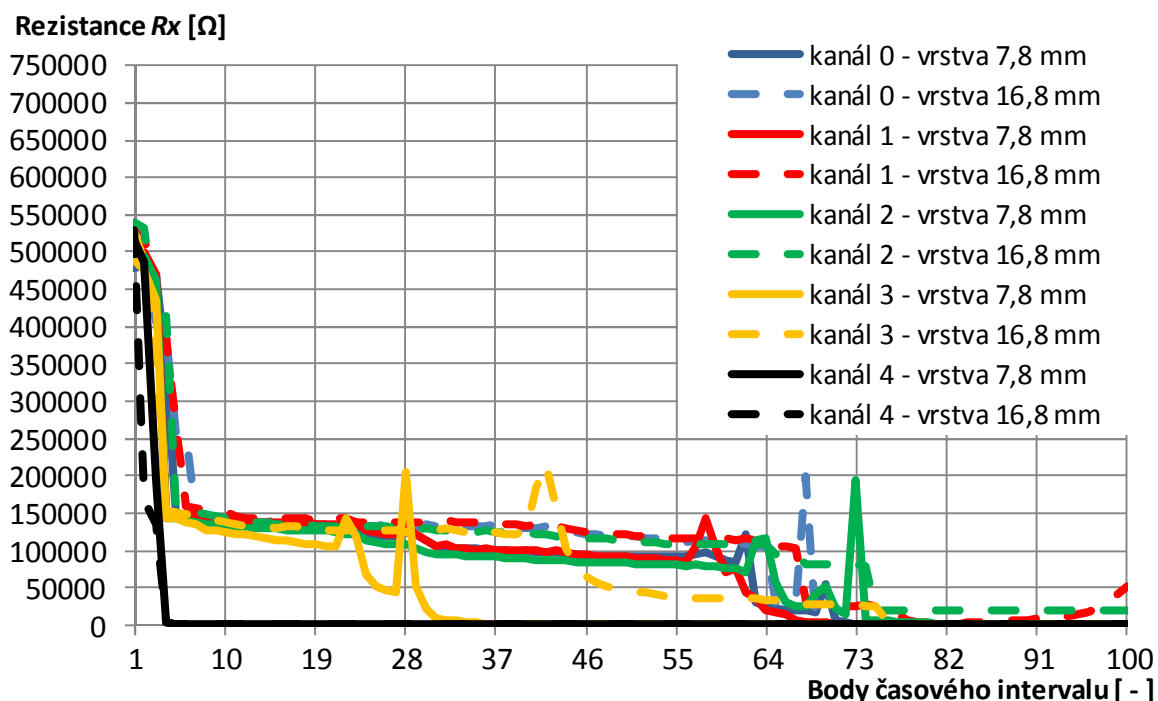
Obr. 8.22 Porovnání vrstev – PN3

Se zvětšením mocnosti vrstvy obsypového materiálu PN3 (nárůst o 115%) došlo k posunutí křivek v čase (Obr. 8.22). U tohoto materiálu je jednoznačně zřejmé, že zvětšením vrstvy obsypu dojde k pomalejšímu nasycení obsypového materiálu. Jak již bylo zmíněno dříve, tento materiál má při styku s vodou dobré vlastnosti. Z tabulky (Tab. 8.22) je patrné, že časový posun křivek na jednotlivých kanálech není konstantní.

Tab. 8.22 Časový posun křivek vzorku PN3 vlivem větší mocnosti obsypové vrstvy

Kanál [č.]	0	1	2	3	4
Časový posun křivek vrstvy 16,8 mm od vrstvy 7,8 mm [Body časového interval *]	4	28	31	13	-1

\* 1 bod časového intervalu odpovídá přibližně 2 sekundám



Obr. 8.23 Porovnání vrstev – W-extra-J-SV

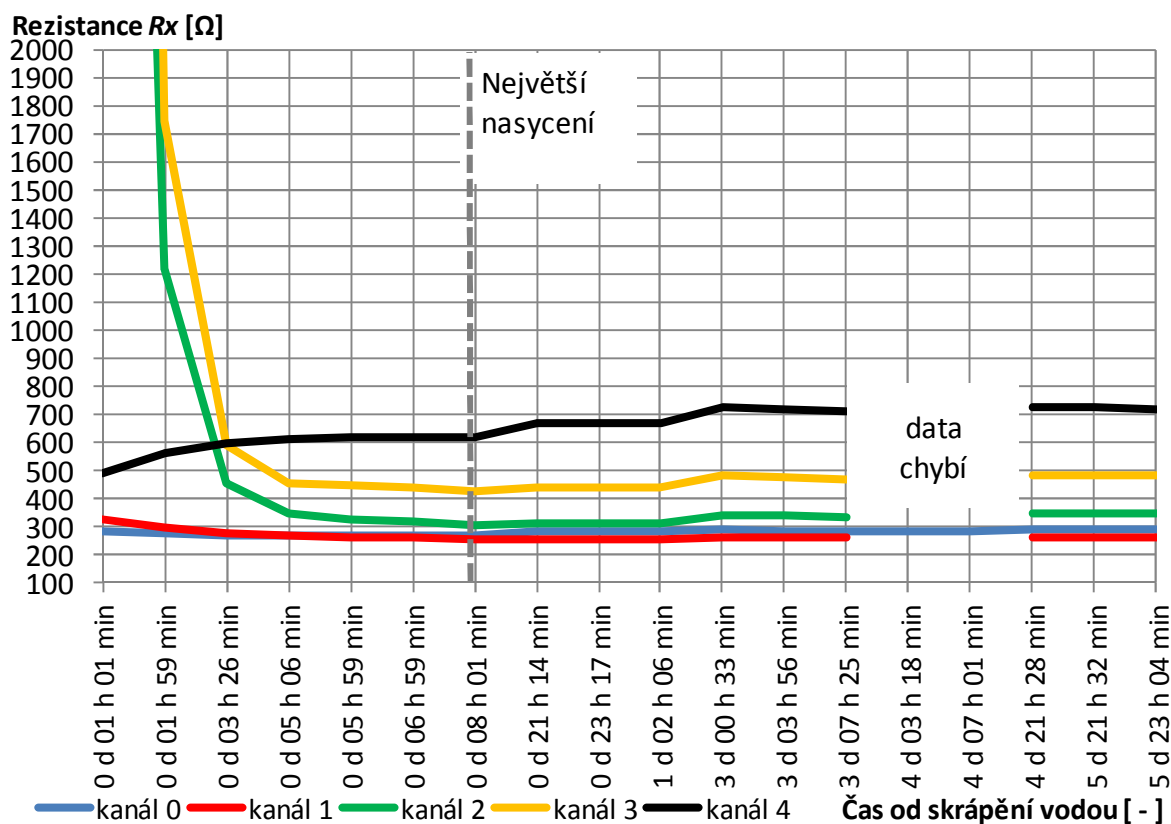
Zvětšením vrstvy jílů W-extra-J-SV se křivky časově posunuly směrem doprava. Posun není zcela pravidelný. Velký rozdíl v posunu je mezi kanálem 3 a ostatními kanály.

## 9 DLOUHODOBÁ MĚŘENÍ

Na základě poznatků z krátkodobých měření jsem se rozhodl provést dlouhodobá měření elektrických vlastností zeminy s uvedenými obsypovými materiály. Důvodem byla především skutečnost, že některé obsypové materiály se při krátkodobém měření zcela nenasytily vodou. Cílem dlouhodobého měření je zjistit, v jakém čase se daný vzorek zcela nasytí vodou.

Měření byla provedena pro všechny 4 obsypové materiály. Obsyp jsem volil ve vrstvě 7,8 mm. Pro jeden materiál jsem po dobu 6 dnů provedl přibližně 16 měření. Při dlouhodobém měření jsem zjistil, že válcová nádoba prokazuje menší netěsnosti ve spoji dna se stěnami nádoby (PŘÍLOHA 4). Naštěstí uvedená netěsnost neměla na zjištění doby nasycenosti vzorku vliv. Odtok vody se projevuje rychlejším zvyšováním hodnoty rezistance  $R$  ke konci dlouhodobého měření především v úrovni blízko povrchu zeminy (kanál 4). Za normálních podmínek by tato hodnota vykazovala pozvolnější růst, protože rezistance  $R$  by se zvyšovala jen vlivem odparu vody ze vzorku.

### 9.1 Nasycenost materiálů vodou v čase



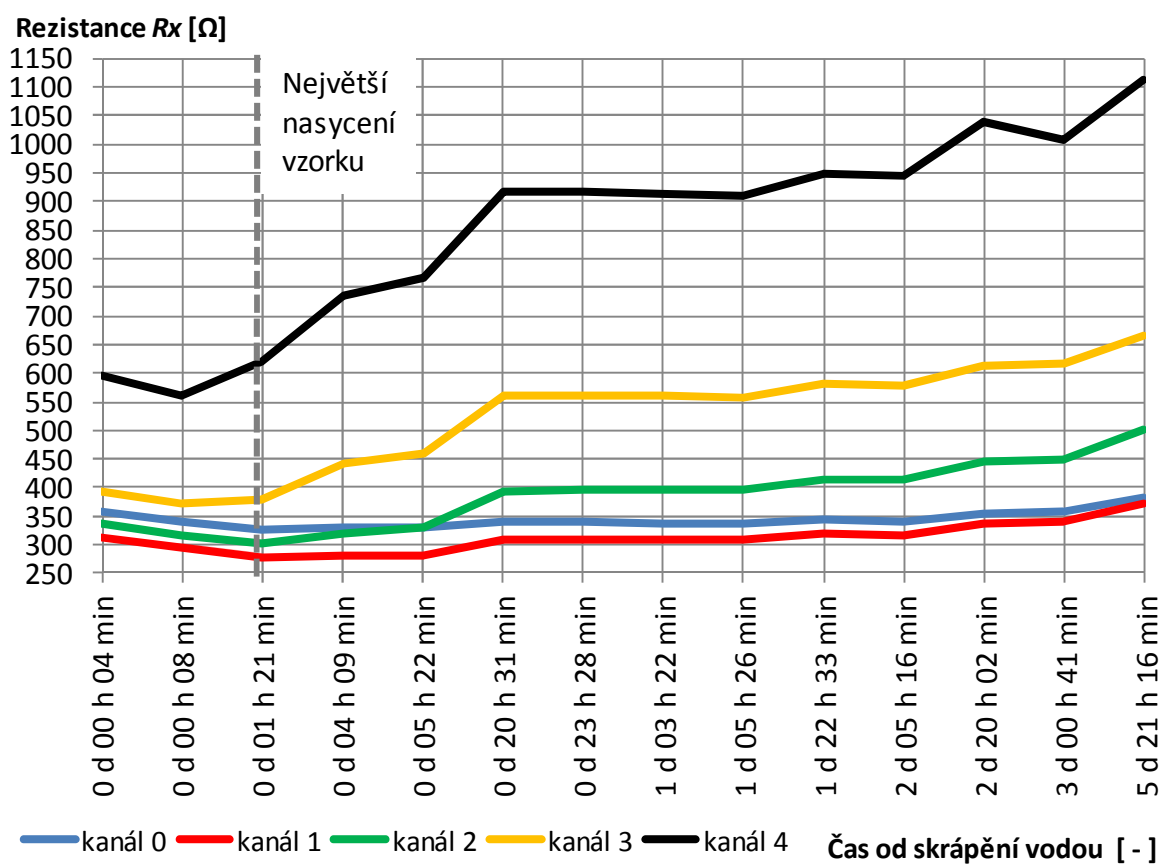
Obr. 9.1 Nasycenost Ekobetonu A+B vodou v čase

**data chybí** - přístroj Z-metr III byl použit pro jiná měření, při opětovném připojení nebyl zkontrolován počet měřicích kanálů. Proto měření neproběhlo ve všech úrovních.



Tab. 9.1 Dlouhodobé měření – vlastnosti Ekobetonu A+B

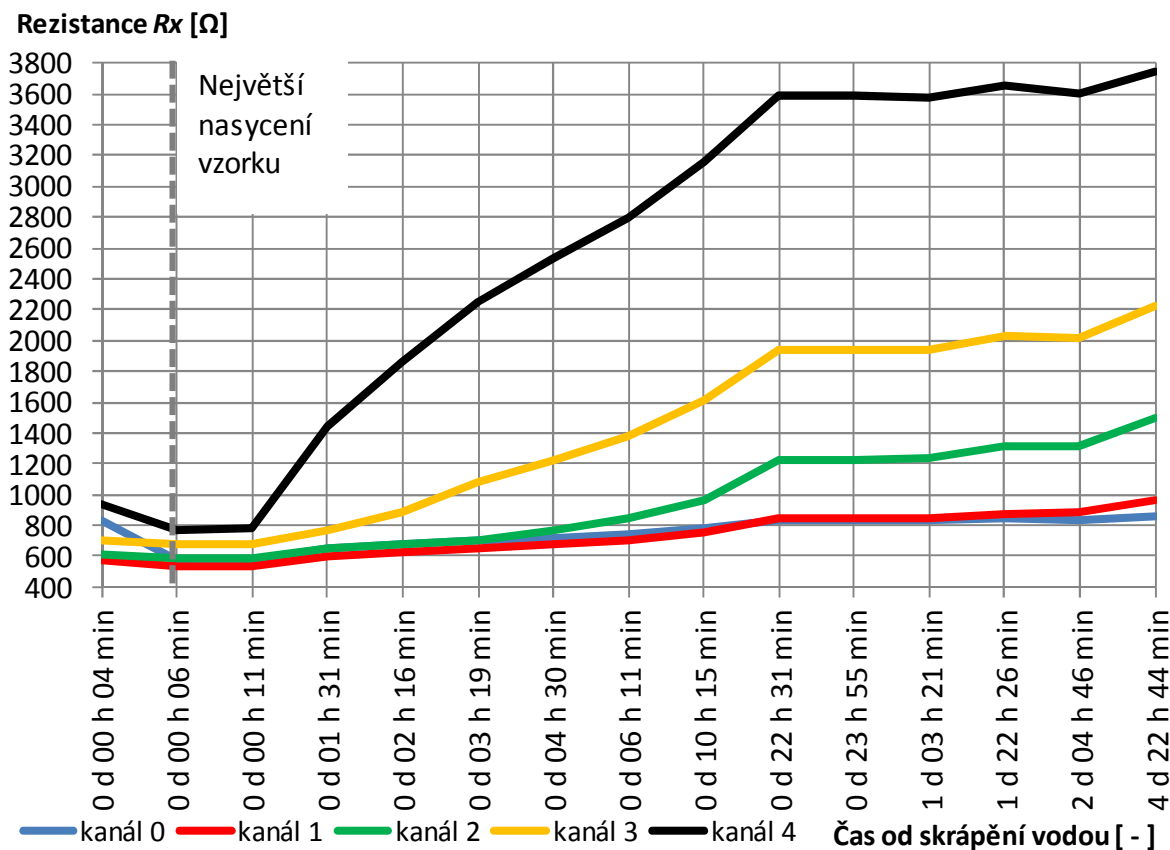
Obsypový materiál	Ekobeton A + B	
Průběh pokusu	před pokusem	na konci pokusu
Stav vzorku	suchý	mokrý
Vrstva obsypu [mm]	7,8	
Hmotnost Bratčice [kg]	18,439	
Teplota Bratčice [°C]	22,8	20,6
Vlhkost Bratčice [%]	35,4	96,9
Hmotnost obsypu [kg]	0,348	0,348
Teplota obsypu [°C]	22,3	20,6
Vlhkost obsypu [%]	38,3	96,9
Teplota okolního prostředí [°C]	21,8	21,5
Vlhkost okolního prostředí [%]	35,1	28,7
Teplota vody [°C]	20,5	20,6
Objem vody [ l ]	4	3
Hmotnost vzorku s vodou [kg]	22,737	21,737



Obr. 9.2 Nasycenost W-extra-J-SV vodou v čase

Tab. 9.2 Dlouhodobé měření – vlastnosti W-extra-J-SV

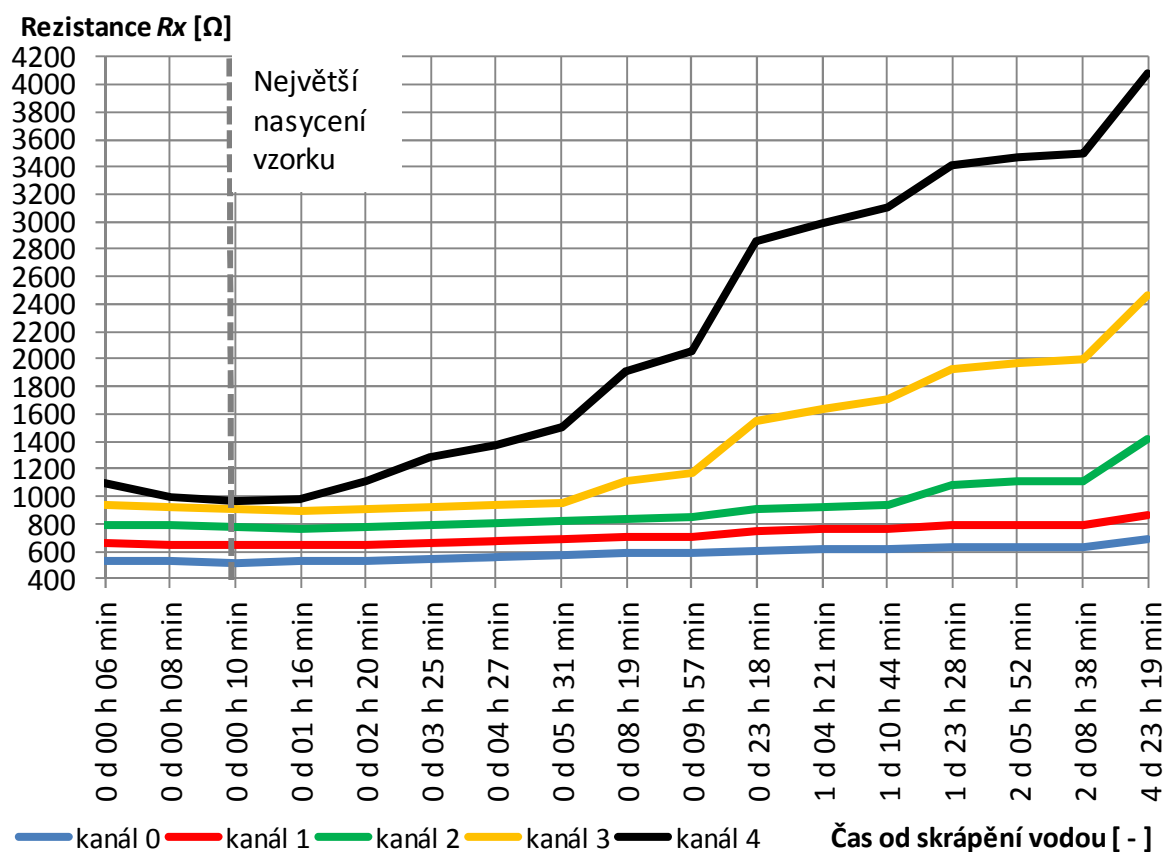
Obsypový materiál	WEXTRA - J-SV	
Průběh pokusu	před pokusem	na konci pokusu
Stav vzorku	suchý	mokrý
Vrstva obsypu [mm]	7,8	
Hmotnost Bratčice [kg]	19,190	
Teplota Bratčice [°C]	21,7	20,7
Vlhkost Bratčice [%]	29,7	96,6
Hmotnost obsypu [kg]	0,347	0,347
Teplota obsypu [°C]	21,6	20,7
Vlhkost obsypu [%]	37,8	96,6
Teplota okolního prostředí [°C]	21,8	21,5
Vlhkost okolního prostředí [%]	51,6	40,2
Teplota vody [°C]	20,4	20,7
Objem vody [ l ]	4	2,4
Hmotnost vzorku s vodou [kg]	23,537	21,590



Obr. 9.3 Nasycenost PN3 v čase

Tab. 9.3 Dlouhodobé měření - vlastnosti PN3

Obsypový materiál	PN3	
Průběh pokusu	před pokusem	na konci pokusu
Stav vzorku	suchý	mokrý
Vrstva obsypu [mm]	7,8	
Hmotnost Bratčice [kg]	19,324	
Teplota Bratčice [°C]	20,6	19,4
Vlhkost Bratčice [%]	39,6	97,1
Hmotnost obsypu [kg]	0,363	0,363
Teplota obsypu [°C]	20,6	19,4
Vlhkost obsypu [%]	38	97,1
Teplota okolního prostředí [°C]	21,5	21,1
Vlhkost okolního prostředí [%]	38,3	45,3
Teplota vody [°C]	20,5	19,4
Objem vody [ l ]	4	1,45
Hmotnost vzorku s vodou [kg]	23,687	21,137



Obr. 9.4 Nasycenost kaolinu Rokle v čase

Tab. 9.4 Dlouhodobé měření - vlastnosti kaolinu Rokle

Obsypový materiál	kaolin Rokle	
Průběh pokusu	před pokusem	na konci pokusu
Stav vzorku	suchý	mokrý
Vrstva obsypu [mm]	7,8	
Hmotnost Bratčice [kg]	19,465	
Teplota Bratčice [°C]	20,7	19,7
Vlhkost Bratčice [%]	36,9	97,1
Hmotnost obsypu [kg]	0,322	0,322
Teplota obsypu [°C]	20,7	19,7
Vlhkost obsypu [%]	38,5	97,1
Teplota okolního prostředí [°C]	21,6	21,8
Vlhkost okolního prostředí [%]	38,5	37,8
Teplota vody [°C]	20,4	19,7
Objem vody [ l ]	4	1,85
Hmotnost vzorku s vodou [kg]	23,787	23,785

Z obrázků dlouhodobého měření je vidět, že každý materiál se nasýtil vodou v různém čase. U vzorku Ekobeton A+B se hodnoty rezistance  $R$  v měřeném čase téměř nemění. Důvodem může být menší průsak nádoby oproti ostatním vzorkům nebo vlastnostmi materiálu, zejména zadržování vody. Porovnání doby úplného nasycení jednotlivých vzorků je uvedeno v tabulce (Tab. 9.5).

Tab. 9.5 Porovnání doby nasycení materiálů

Materiál	Doba úplného nasycení vzorku vodou
Ekobeton A+B	0 d 08 h 01 min
W-extra-J-SV	0 d 01 h 21 min
PN3	0 d 00 h 06 min
Kaolin Rokle	0 d 00 h 10 min
Bratčice	0 d 00 h 02 min

Jako nejvhodnější materiál z hlediska rychlosti detekce nasycenosti měřeného prostředí (zemina s obsypovým materiálem v tloušťce vrstvy 7,8 mm) vodou je podle tabulky (Tab. 9.5) těžený jíl PN3. Tento vzorek rovněž vykazuje nejmenší rozptyl měřených hodnot

v uvedeném čase. Při zkoumání časového vývoje křivek v jednotlivých úrovních, je možno vyslovit předpoklad, že po dobu 4 h 30 min byl vzorek v úrovních 0, 1 a 2 nasycen. Obdobných vlastností z hlediska dlouhodobého pozorování dosáhl vzorek s obsypovým materiálem kaolin Rokle. Naopak výsledné hodnoty vzorku Ekobeton A+B dopadly zcela nejhůře. Je to nejspíše zapříčiněno jeho vlastnostmi, zejména bobtnavostí.

Právě doba nasycení obsypového materiálu má velký vliv na měření. Obsypové materiály mají určitou časovou prodlevu v nasycenosti vodou oproti měřenému prostředí (písek Bratčice), které je nasyceno prakticky v okamžiku styku s vodou (do 2 minut, což se rovná době nalévání vody).

## 9.2 Porovnání stejnorodosti materiálů

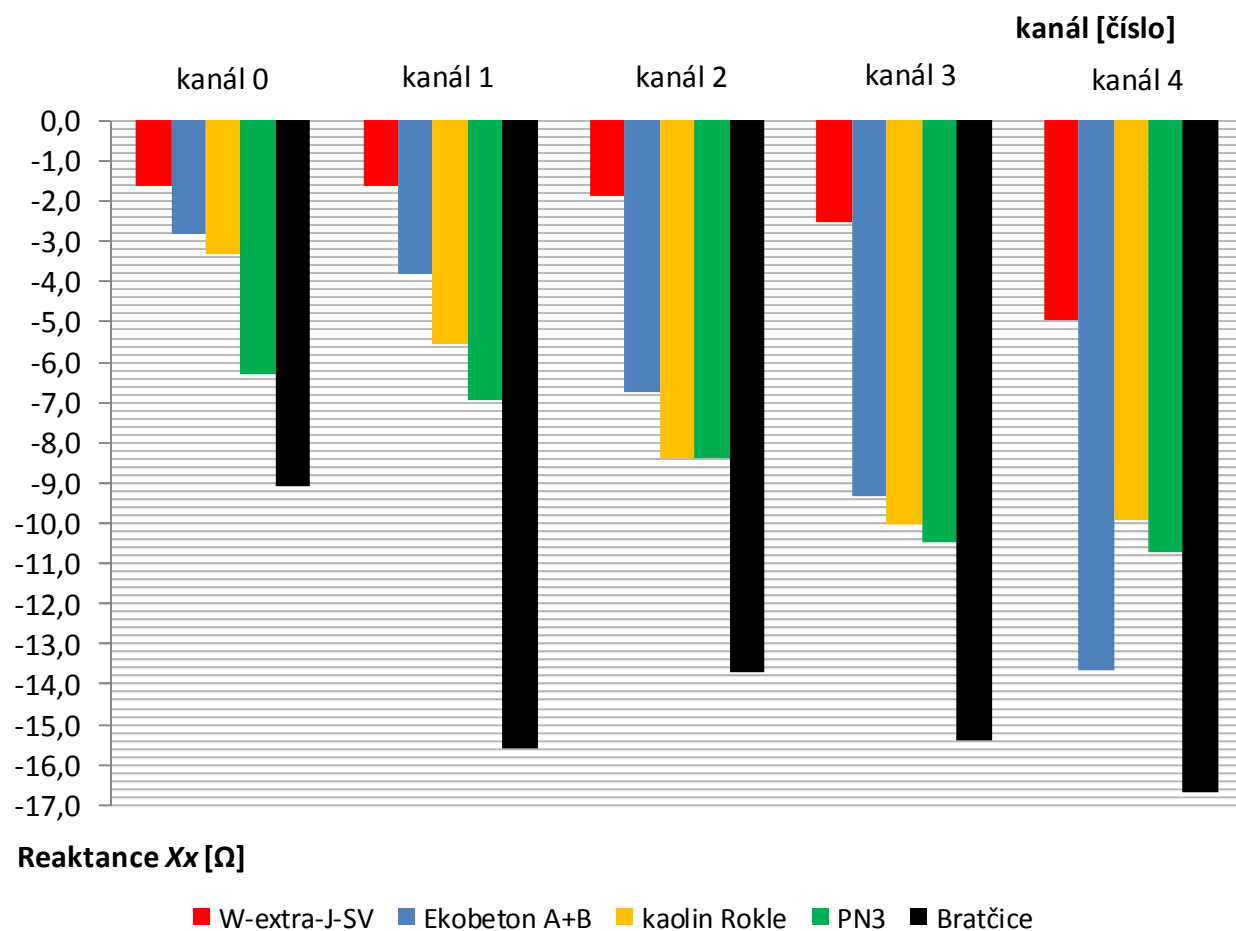
Pro porovnání stejnorodosti zkoumaného prostředí jsem vybral dlouhodobá měření při největší nasycenosti vzorků. Z těchto měření jsem kromě hodnoty rezistance  $R$  stanovil aritmetickým průměrem hodnoty naměřených reaktancí  $X_x$ . Pomocí reaktance  $X_x$  jsem porovnal odpor na jednotlivých kanálech. Každý kanál měřil v jiné hloubce (Tab. 9.6). Z obrázku (Obr. 9.5) je vidět, že vlivem působení tlaku vody a horních vrstev vzorku se ulehlost a tudíž i reaktance s hloubkou mění.

**Tab. 9.6 Hloubky umístěných snímačů**

Kanál	Průměrná hloubka [mm]
4	12,9
3	64,2
2	115,5
1	166,8
0	218,1

Pro referenční vzorek písek Bratčice jsem použil hodnoty z krátkodobého měření, kdy byl vzorek plně nasycen. Jedná se o posledních cca 10 hodnot, z kterých jsem stanovil aritmetický průměr.





**Obr. 9.5 Stejnorodost materiálů**

Zajímavostí je, že po nasycení zeminy vodou vykazuje vzorek písek Bratčice vyšší hodnoty reaktance  $X_x$  než vzorky s obsypovým materiálem. Je to pravděpodobně způsobeno i tím, že referenčním vzorkem zeminy je modifikovaný bratčický písek popsáný křivkou zrnitosti s velikostí efektivního zrna  $d_{ef} = 1,2$  mm.

Použité obsypové materiály, jejichž maximální zrno bylo vždy menší než 5 mm, mohly pravděpodobně způsobit kolmataci zeminy, což se projevilo v hodnotách měřené reaktance.

## 10 VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ

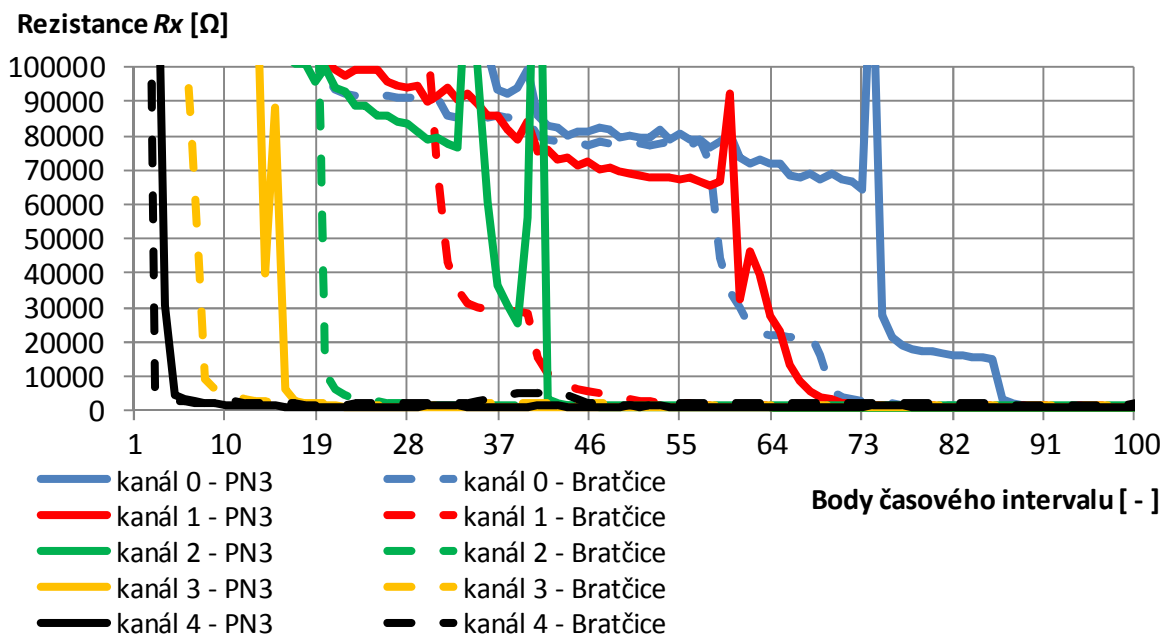
Měření vlivu tloušťky vrstvy a typu obsypového materiálu sondy elektrické impedanční spektrometrie na citlivost měření jsem provedl pro 4 obsypové materiály: Ekobeton A + B, kaolin Rokle a těžené jíly PN3 a W-extra-J-SV. Experiment jsem provedl v několika variantách, kdy jsem obsypové materiály měřil v suchém a mokřém stavu ve dvou vrstvách tloušťky obsypu 7,8 mm a 16,8 mm jako krátkodobá měření. Dlouhodobá měření jsem uskutečnil s vrstvou obsypu 7,8mm.

V suchém stavu se jevil jako nejvhodnější materiál pro obsyp Ekobeton A+B. Při nárůstu tloušťky vrstvy obsypového materiálu se zvýšila hodnota rezistance  $R$  ve všech hloubkových úrovních resp. na všech kanálech přibližně stejně. Měření uvedeného typu zeminy v suchém stavu ovšem nemá v našich podmínkách výrazného praktického uplatnění. Na uvedeném měření jsem chtěl ukázat a doložit, že charakteristika obsypového materiálu má vliv na citlivost měření aparaturou s přístrojem Z-metr III.

Těžiště své práce spatřuji při měření vzorků skrápěných vodou (mokřý stav). Jednotlivé výsledky měření zaznamenávají průběh průsaku vody zeminou (modifikovaný vzorek písek Bratčice) s různými obsypovými materiály. Na základě provedených variant experimentu jsem jako nejvhodnější obsypový materiál vyhodnotil těžенý jíl PN3. Při použití jílu PN3 se vzorek zeminy nasýtl sice později než v případě samotné zeminy tj. referenčního vzorku písek Bratčice, ale zachoval si podobnost průběhu křivek. Dále je možno konstatovat, že s větší vrstvou obsypového materiálu byla i reakce jednotlivých snímačů na sondě pomalejší, avšak stále při zachování doby reakce v jednotlivých úrovních. Proto bych uvedený materiál vyhodnotil jako nejvhodnější k provádění obsypu sondy metody EIS. Aby bylo možno při praktických aplikacích jednoznačně vyhodnocovat změny v jednotlivých výškových úrovních a byla tak zachována nesporná výhoda aparatury s přístrojem Z-metr III, je nutné, stejně jako při laboratorním experimentu, zaručit po celé výšce sondy instalaci stejné tloušťky vrstvy obsypového materiálu. V píscích to například bude zcela jistě, při instalaci sondy, vyžadovat vypořádaný vrt s přísně definovaným průměrem pro obsypový materiál.

Z dlouhodobého měření jsem zjistil, že jíl PN3 se ze všech obsypových materiálů nasýtl v nejkratší době, a to cca za 6 minut od počátku sycení válcové nádoby se zeminou vodou. Vyhodnocení jsem provedl při tloušťce obsypového materiálu 7,8 mm.

Celkově bych stanovil za nejvhodnější obsypový materiál jíl PN3 při použití vrstvy obsypu 7,8 mm. Při této mocnosti vrstvy byl průběh nasycení nejpodobnější výchozímu vzorku zeminy (písek Bratčice).



Obr. 10.1 Vzorek PN3 - obsyp 7,8 mm

Tab. 10.1 Časový posun křivek vzorku PN3 (7,8 mm) od vzorku Bratčice

Kanál [č.]	0	1	2	3	4
Časový posun křivek [Body časového interval *]	17	24	22	9	1

\* 1 bod časového intervalu odpovídá přibližně 2 sekundám

Pro měření bych materiál PN3 doporučil, ale jen za podmínek, že měření bude jednorázové, obsyp bude na začátku měření v suchém stavu a měřeným prostředím bude písčité prostředí. Omezující podmínky jsem odvodil z průběhu mého experimentu. Pro dlouhodobé měření zatím materiál nemohu doporučit, protože nemám jeho vlastnosti ověřeny pro různé varianty možných a předpokládaných provozních stavů. Například jsem při svém experimentu nezkoumal chování vzorku obsypového materiálu při vysychání. Provedená dlouhodobá laboratorní měření např. nepostihují vliv náhlých změn počasí apod. Proto by bylo vhodné provést další výzkum materiálu vzhledem k terénním podmínkám měření.

V Brně dne 15.5.2013

-----  
Jakub Slezák

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [01] KUTÍLEK, M., KURÁŽ, V., CÍSLEROVÁ, M. (1993). *Hydropedologie*, skriptum ČVUT, Praha
- [02] WEIGLOVÁ, K. (2005). *Mechanika zemin*, modul BF02-M01, Studijní opory VUT v Brně, FAST.
- [03] CÍSLEROVÁ, M., VOGEL, T. (2008). *Transportní procesy*, ČVUT, Praha.
- [04] LAMBOJ, Ladislav; ŠTÉPÁNEK, Zdeněk. *Mechanika zemin a zakládání staveb*. 2005. vyd. [s.l.] : Vydavatelství ČVUT. 214 s.
- [05] WEIGLOVÁ, K. (2005). *Mechanika zemin*, modul BF02-M02, Studijní opory VUT v Brně, FAST.
- [06] KOLÁŘ, V., PATOČKA, C., BEM, J. (1983). *Hydraulika*. SNTL/ALFA, Praha.
- [07] JANDORA, J., ŠULC, J. (2006) *Hydraulika*, modul 01, Studijní opora VUT v Brně, FAST.
- [08] Electrical methods. US EPA [online]. [cit. 2013-03-28]. Dostupné na:  
[http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/methods/Surface\\_Geophysical\\_Methods/Electrical\\_Methods/index.htm](http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/methods/Surface_Geophysical_Methods/Electrical_Methods/index.htm)
- [09] Our case studies. Landviser, LLC [online]. [cit. 2013-03-28]. Dostupné na:  
<http://www.landviser.net/content/our-case-studies>
- [10] Methods :: Terrestrial Geophysics :: Electrical Methods. Global Geophysics [online]. [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://www.globalgeophysics.com/methods-electrical.php>
- [11] Monitorování proudění vody zeminou a možnosti jeho využití u ochranných hrází. Teze habilitační práce. Brno. ISBN 978-80-214-4068-5.  
PAŘÍLKOVÁ J., PAVLÍK J. Realizace – výzkum, vývoj a výroba automatizovaného systému sledování změn vlhkosti zemin metodou EIS. Oponované zprávy projektu OE240 za roky 2007, 2008 a 2009. Brno. 2008, 2009, 2010.  
PAŘÍLKOVÁ J., PAVLÍK J. (2010). Automatizovaný systém pro analýzu vybraných charakteristik a procesů v porézním prostředí metodou EIS. Dílčí oponovaná zpráva projektu OE10002 za rok 2010. Brno.
- [12] PAŘÍLKOVÁ, J. (2011). *Z-meter III - User's Manual*, Brno University of Technology, Brno
- [13] Produkty. KERAMOST, a.s. [online]. [cit. 2013-03-28]. Dostupné na:  
<http://www.keramost.cz/cz/produkty>

## SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 Klasifikace zemin - orientační hodnoty.....	17
Tab. 3.2 Orientační hodnoty pórovitosti.....	18
Tab. 3.3 Kapilární výšky různých zemin.....	18
Tab. 3.5 Klasifikace zemin dle stupně nasycení.....	21
Tab. 6.1 Parametry Z-metru III .....	28
Tab. 7.1 Párová sonda - vlastnosti.....	32
Tab. 7.2 Hmotnost a rozměry plastových trubek.....	33
Tab. 7.3 Písek Bratčice – zastoupení složek zeminy ve vzorku .....	37
Tab. 7.4 Ekobeton A+B – technické parametry .....	38
Tab. 7.5 Ekobeton A+B – průměrné chemické složení bentonitových přípravků .....	38
Tab. 7.6 Těžené jíly – chemické složení .....	40
Tab. 7.7 Těžené jíly – technické parametry.....	40
Tab. 7.8 Těžené jíly - využití.....	40
Tab. 7.9 Kaolin Rokle – technické parametry .....	41
Tab. 7.10 Kaolin Rokle - chemické složení.....	41
Tab. 8.1 Parametry měření .....	45
Tab. 8.2 Vlastnosti vzorku písek Bratčice .....	47
Tab. 8.3 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – Ekobeton A+B - obsyp 7,8 mm.....	47
Tab. 8.4 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – Ekobeton A+B - obsyp 16,8 mm.....	48
Tab. 8.5 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – kaolin Rokle - obsyp 7,8 mm .....	48
Tab. 8.6 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – kaolin Rokle - obsyp 16,8 mm .....	49
Tab. 8.7 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – PN3 - obsyp 7,8 mm.....	49
Tab. 8.8 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – PN3 - obsyp 16,8 mm.....	50
Tab. 8.9 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – W-extra-J-SV - obsyp 7,8 mm .....	50
Tab. 8.10 Vlastnosti vzorku v suchém stavu – W-extra-J-SV - obsyp 16,8 mm .....	51
Tab. 8.11 Průměrné hodnoty rezistance $R$ zkoumaných materiálů .....	51
Tab. 8.12 Rozdíl hodnot $R_x$ materiálů od Bratčice.....	52
Tab. 8.13 Vlastnosti Bratčice .....	53
Tab. 8.14 Vlastnosti vzorku – Ekobeton A+B - obsyp 7,8 mm .....	54
Tab. 8.15 Vlastnosti vzorku – Ekobeton A+B - obsyp 16,8 mm .....	55
Tab. 8.16 Vlastnosti vzorku – kaolin Rokle – obsyp 7,8 mm .....	56



Tab. 8.17 Vlastnosti vzorku – kaolin Rokle – obsyp 16,8 mm .....	57
Tab. 8.18 Vlastnosti vzorku – PN3 – obsyp 7,8 mm.....	58
Tab. 8.19 Vlastnosti vzorku – PN3 – obsyp 16,8 mm.....	59
Tab. 8.20 Vlastnosti vzorku – W-extra-J-SV – obsyp 7,8 mm .....	60
Tab. 8.21 Vlastnosti vzorku – W-extra-J-SV - obsyp 16,8 mm .....	61
Tab. 8.22 Časový posun křivek vzorku PN3 vlivem větší mocnosti obsypové vrstvy .....	63
Tab. 9.1 Dlouhodobé měření – vlastnosti Ekobetonu A+B.....	65
Tab. 9.2 Dlouhodobé měření – vlastnosti W-extra-J-SV .....	66
Tab. 9.3 Dlouhodobé měření - vlastnosti PN3 .....	67
Tab. 9.4 Dlouhodobé měření - vlastnosti kaolinu Rokle.....	68
Tab. 9.5 Porovnání doby nasycení materiálů .....	68
Tab. 9.6 Hloubky umístěných snímačů .....	69
Tab. 10.1 Časový posun křivek vzorku PN3 (7,8 mm) od vzorku Bratčice.....	72

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Zajištění kontaktu sondy se zeminou .....	13
Obr. 2.1 Pracoviště .....	14
Obr. 3.1 Hydrologický cyklus .....	15
Obr. 3.2 Třífázový systém zeminy .....	16
Obr. 3.3 Křivka zrnitosti zemin .....	16
Obr. 3.4 Voda v zemině.....	19
Obr. 4.1 Mise-à-la-Masse metoda: a) el. pole bodu, b) el. pole rudního tělesa.....	22
Obr. 4.2 IP stejnosměrného proudu .....	23
Obr. 4.3 IP střídavého proudu .....	23
Obr. 5.1 Grafické znázornění fázoru elektrické impedance .....	25
Obr. 5.2 Zemina jako elektrický vodič .....	26
Obr. 6.1 Přístroj Z-metr III .....	27
Obr. 6.2 Blokové schéma Z-metru III .....	28
Obr. 6.3 Hlavní menu .....	29
Obr. 6.4 Menu časovaného měření.....	29
Obr. 6.5 Uložení nastavení .....	29
Obr. 6.6 Název datového souboru .....	29
Obr. 6.7 Průběh měření .....	30
Obr. 6.8 Ukázka výstupního textového souboru .....	30
Obr. 6.9 Konektory pro připojení sondy .....	30
Obr. 7.1 Párová sonda .....	32
Obr. 7.2 Válcová nádoba .....	32
Obr. 7.3 Plastové trubky pro obsyp - a) DN50, b) DN32.....	33
Obr. 7.4 Upravená PET láhev pro přívod vody .....	34
Obr. 7.5 Multimetr Testo 454.....	34
Obr. 7.6 Váhy: a) digitální, b) decimální.....	35
Obr. 7.7 Modifikovaný písek Bratčice .....	36
Obr. 7.8 Granulometrická křivka vzorku písek Bratčice.....	36
Obr. 7.9 Ekobeton A+B.....	38
Obr. 7.10 PN-3 S5 08: a) hrubá frakce, b) frakce do 5 mm .....	39
Obr. 7.11 W-extra-J-SV: a) hrubá frakce, b) frakce do 5 mm.....	39
Obr. 7.12 Kaolin Rokle, a) hrubá frakce, b) frakce do 5 mm.....	41

Obr. 7.13 Umístění sond.....	42
Obr. 7.14 Umístění sond s obsypem.....	42
Obr. 7.15 Měření vlhkosti a teploty.....	43
Obr. 7.16 Voda ve vzorku .....	44
Obr. 7.17 Měření metodou EIS .....	44
Obr. 8.1 Vrstva obsypu.....	45
Obr. 8.2 Měření Bratčice – suchý stav .....	46
Obr. 8.3 Měření Ekobeton A+B - obsyp 7,8mm – suchý stav .....	47
Obr. 8.4 Měření Ekobeton A+B - obsyp 16,8 mm – suchý stav .....	47
Obr. 8.5 Měření kaolin Rokle - obsyp 7,8 mm - suchý stav.....	48
Obr. 8.6 Měření kaolin Rokle - obsyp 16,8 mm - suchý stav.....	48
Obr. 8.7 Měření PN3 - obsyp 7,8 mm - suchý stav .....	49
Obr. 8.8 Měření PN3 - obsyp 16,8 mm - suchý stav .....	49
Obr. 8.9 Měření W-extra-J-SV - obsyp 7,8 mm – suchý stav .....	50
Obr. 8.10 Měření W-extra-J-SV - obsyp 16,8 mm – suchý stav .....	50
Obr. 8.11 Měření Bratčice – mokrý stav .....	52
Obr. 8.12 Měření Ekobeton A+B – obsyp 7,8 mm –mokrý stav.....	53
Obr. 8.13 Měření Ekobeton A+B – obsyp 16,8 mm –mokrý stav.....	54
Obr. 8.14 Měření kaolin Rokle – obsyp 7,8 mm – mokrý stav .....	55
Obr. 8.15 Měření kaolin Rokle – obsyp 16,8 mm – mokrý stav .....	56
Obr. 8.16 Měření PN3 - obsyp 7,8 mm -mokrý stav .....	57
Obr. 8.17 Měření PN3 – obsyp 16,8 mm – mokrý stav.....	58
Obr. 8.18 Měření W-extra-J-SV – obsyp 7,8 mm – mokrý stav .....	59
Obr. 8.19 Měření W-extra-J-SV - obsyp 16,8 mm -mokrý stav.....	60
Obr. 8.20 Porovnání vrstev – Ekobeton A+B.....	61
Obr. 8.21 Porovnání vrstev – kaolin Rokle .....	62
Obr. 8.22 Porovnání vrstev – PN3.....	62
Obr. 8.23 Porovnání vrstev – W-extra-J-SV .....	63
Obr. 9.1 Nasycenost Ekobetonu A+B vodou v čase .....	64
Obr. 9.2 Nasycenost W-extra-J-SV vodou v čase .....	65
Obr. 9.3 Nasycenost PN3 v čase.....	66
Obr. 9.4 Nasycenost kaolinu Rokle v čase .....	67
Obr. 9.5 Stejnorodost materiálů.....	70
Obr. 10.1 Vzorek PN3 - obsyp 7,8 mm.....	72

## **SEZNAM PŘÍLOH**

### **SEZNAM TIŠTĚNÝCH PŘÍLOH**

1. Vzor výstupního souboru
2. Fotodokumentace a popis měření
3. Bobtnavost a nasycenost materiálů
4. Netěsnost nádoby

### **SEZNAM DIGITÁLNÍCH PŘÍLOH**

1. 1 EIS dlouhodobé ekobeton A+B.xlsx
2. 2 EIS dlouhodobé W-extra-J-SV.xlsx
3. 3 EIS dlouhodobé PN3.xlsx
4. 4 EIS dlouhodobé kaolin Rokle.xlsx
5. 5 EIS stejnorodost.xlsx
6. 6 EIS\_kratkodoba\_mereni.xlsx